



**Fakultät II - Informatik, Wirtschafts- und Rechtswissenschaften
Department für Informatik**

**Testfeld für optische Sensoren zur
Erstellung von maritimen Umweltlagebildern
und optischer Strömungsmessung**

**Dissertation zur Erlangung eines Grades und Titels eines
Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr. -Ing.)**

vorgelegt von

Nick Rüssmeier

geboren am 30.04.1979 in Delmenhorst

Gutachter:
Prof. Dr. Zielinski
Prof. Dr.-Ing. Axel Hahn

Datum der Disputation: 27.September 2017

Kurzfassung

Testfelder ermöglichen unter realen Einsatzbedingungen Messstrategien, Auswerteverfahren oder Potentiale von neuen Techniken vor einer kostspieligen Systemintegration, zu charakterisieren, zu demonstrieren und zu evaluieren. Einhergehend mit der fortschreitenden Entwicklung von optischen Sensoren besteht aus mehreren Forschungs- und Anwendungsbereichen ein Interesse und Bedarf an einer homogenen Testfeldumgebung für optische Sensoren. Gemeinsame Anforderungen wie z. B. flexible Konfiguration während der Laufzeit, Schnittstelle für Simulationen, Rückverfolgbarkeit der Daten oder Reproduzierbarkeit von Experimenten, um nur einige zu nennen, bleiben derzeit jedoch mit vorhandenen Testfeldsystemen für optische Sensoren unvollständig abgedeckt, sind jedoch wichtig um die Forschung und Entwicklung für zukünftige Aufgaben zu unterstützen. Optische Sensoren sowie Beobachtungssysteme können zum Beispiel unterstützend für die maritime Verkehrsbeobachtung genutzt werden und erhöhen damit die Sicherheit sowie indirekt den Schutz der Meeresumwelt durch die Reduzierung oder Vermeidung von Unfällen. Ein möglichst umfassendes Umweltlagebild ermöglicht darüber hinaus auch, Rückschlüsse für eine verträgliche Nutzung und den Schutz von marinen Ökosystemen zu erhalten. Eine gängige Strategie besteht darin geographisch verteilte Informationen zu fusionieren, um die räumliche Situation und zeitliche Entwicklung einer Umgebung im Gesamtkontext darzustellen. Optische Fernerkundungssysteme bieten hierfür räumlich sowie zeitlich hochauflösende multivariante Informationen, beispielsweise über den Zustand der Umwelt und einer Verkehrssituation.

Diese Arbeit widmet sich der Entwicklung eines Testfeldsystems sowie der Erforschung von Anwendung mit Testfeldern für optische Sensoren für Experimente im Bezug der Umwelt- und Verkehr in realen maritimen Studienumgebungen. Die Aufgabe des Testfeldsystems umfasst dabei zum einen die flexible Ausstattung von großflächigen maritimen Studiengebieten mit vernetzten optischen Sensoren als Testfeld im stationären sowie mobilen Betrieb. Sensordaten werden dabei über eine zu Grunde liegende Datenstromarchitektur mit einem Datenstrommanagementsystem verarbeitet, ggf. gespeichert, fusioniert und zwischen Sensorsystemen sowie Nutzern ausgetauscht. Weiterhin unterstützt das Testfeldsystem die online Detektion von relevanten Situationen, die Bereitstellung von fusionierten Informationen, einschließlich Metainformationen sowie die Bereitstellung dieser Daten in Form einer kollektiven Studienszene für die fortführende Forschung und Entwicklung.

Im Rahmen dieser Arbeit werden Testfelder für die Erstellung von maritimen Umweltlagebildern in stationären sowie mobilen Verkehrs- und Umweltstudien, sowie weiterhin für die optische Strömungsmessung in Offshoreregionen erprobt.

Eine Studie betrachtet dabei ein Testfeld mit mehreren geographisch verteilten Sensorsystemknoten zu Erzeugung eines fusionierten Umweltlagebildes. Dabei formen die Sensorsysteme ein Netzwerk mit Datenfernübertragung. Mehrere Nutzer können dadurch unmittelbar verteilte Informationen gemeinsam nutzen und Anwendungen für z. B. Forschung und Entwicklung im Bereich des maritimen Verkehrs erproben. Räumliche- und zeitliche- Beobachtungen unterschiedlicher spektraler Empfindlichkeitsbereiche von optischen Sensoren bieten weiterhin Informationen über den Zustand der Umgebung und Umweltparameter. Anhand unterschiedlicher Szenarien im stationären und mobilen Einsatz können somit Strukturen und Merkmale von Transport und Umwelt aus den optischen Informationen diskriminiert werden.

Eine weitere Studie adressiert die Wiederverwendung von aufgezeichneten Video- und Metadaten für weitere Analysen und demonstriert das Potential durch den offshore Einsatz eines Testfelds in der Nordsee. Dabei steht die Frage im Vordergrund Informationen für hydrographische Parameter des Meeres, wie beispielsweise die vorherrschende horizontale Oberflächenströmung und Richtung, mittels multivarianter Bildanalysemethoden zugänglich zu machen, da diese Informationen mit bisherigen Messverfahren nur ungenügend ermittelt werden können. Hierfür wird die Entwicklung und Applikation eines LSPIV (Large Scale Particle Image Velocimetry) Fernerkundungsmessverfahrens vorgestellt, welches der modernen marinen Umweltbeobachtung einen erweiterten Ansatz in Form von raum- und zeitaufgelösten Informationen der Meeresoberfläche zur Verfügung stellt.

Die präsentierten Studien in der maritimen Umgebung adressieren somit unterschiedliche offene Fragestellungen aus dem Bereich Umwelt und Verkehr. Zusammen mit Laborevaluationen hinsichtlich optischer Abbildungsqualität der eingesetzten Kameras sowie der Validierung von Testfelddaten mittels in situ Referenzmessungen wird die Eignung des vorgeschlagenen Designs, der Architektur und Funktionsweise des Testfeldsystems aufgezeigt.

Abstract

Testbeds facilitates to characterize, demonstrate and test operating principles under real operating conditions, to identify measurement strategies or to evaluate potentials of new technologies. Along with the advancing development of optical sensors, there is an interest and need for a homogeneous testbed environment for optical sensors from various research and application areas. Mutual requirements for such a testbed, e.g. flexible configuration during runtime, interface for simulations, traceability of the data or reproducibility of experiments, to name but a few, are currently incompletely covered with existing testbed-systems for optical sensors. But these are important key points to support the research and development for future tasks. Optical sensors and observation systems can be used e.g. to monitor and support maritime traffic. Thus increasing the safety and indirect protection of the marine environment by reducing or avoiding accidents. Further on, a comprehensive environmental picture can be used to draw one's conclusions for a sustainable and acceptable utilization and the protection of our marine ecosystems. A common strategy to represent a situation and variations of an environment in an overall context can be achieved by fusing geographically distributed information. For this purpose, optical remote sensing systems provide spatially and temporally multivariate information in high-resolution and facilitate therefore investigations for the state of the maritime environment and traffic situations.

This work is devoted to the development of a testbed-system for optical sensors, which provides a platform for various experiments. Further on, the research of application scenarios and activities in real maritime environments are addressed within this work. The aim of the testbed-system is to provide a flexible equipment and interconnected sensors in large-scale maritime areas, to collect and provide information from the marine environment and transportation in once. Sensor data is processed by means of a data stream architecture with a data flow management system, if needed recorded, fused and exchanged between sensor-systems and multiple users. Furthermore, the testbed-system supports the online detection of relevant situations, the provision of fused information, including meta-information, as well as the provision of these data in the form of a collective study scene for continued research and development activities.

Within the ambit of this thesis, testbed applications are investigated for the creation of a comprehensive marine situational picture in stationary as well mobile transportation- and environmental- studies. Furthermore, applications for the evaluation of remote sensing measurement techniques, in here for the development of an optical flow measurement of the sea surface in offshore regions, are addressed.

One study is devoted to a testbed which is formed from several geographically distributed sensor-nodes. Distributed data were gathered and then fused, to provide a situational picture of the maritime environment. The sensor-systems provide a network with remote data transmission in real study areas. Multiple users can access the shared distributed information and use the information to test various applications, for e.g. research and development activities in maritime transportation. Spatiotemporal observations from various optical sensors in different electromagnetic bands demonstrates how to access the information of the environmental status and transportation in once. Based on different scenarios in stationary and mobile use cases, the optical information can thus be used to discriminate structures and characteristics of maritime transportation and the environment.

Another study addresses the re-use of recorded video and metadata for further analysis and demonstrates the offshore deployment of a testbed in the North Sea. The main task is to access hydrographic parameters, such as the predominant horizontal sea surface flow velocities and flow directions. In here, remote sensing methods by means of spatiotemporal multivariate image analysis are presented. Since the information of the sea surface can add value to existing measuring systems, which provide inadequately recorded data in this area of interest. For this purpose, the development and successful application of a LSPIV (Large-Scale Particle Image Velocimetry) remote sensing measurement method is realized. By this an extended approach in the form of space- and time-resolved sea surface information is presented, which supports the research activities in modern marine environmental monitoring systems.

The presented studies in the maritime domain thus address different open research questions in the area of environment and transportation. In supplement with laboratory evaluations regarding the imaging quality of optical sensors as well as the validation of testbed-data with in situ reference measurements, the suitability of the proposed design, the architecture and the functioning of the testbed-system is revealed.

Inhalt

1	Einleitung	1
1.1	Motivation.....	1
1.2	Problemstatement.....	5
1.3	Zielsetzung, erwartete Ergebnisse und wissenschaftlicher Beitrag	7
1.3.1	Zielsetzung.....	7
1.3.2	Erwartete Ergebnisse	8
1.3.3	Wissenschaftlicher Beitrag	10
1.4	Aufbau der Arbeit	12
2	Systemanforderungen und Stand der Technik	14
2.1	Informationsgewinnung, Übertragung.....	15
2.1.1	Informationsgewinnung.....	15
2.1.2	Informationsübertragung	17
2.2	Testfeldumgebungen und Einsatzbedingungen	18
2.3	Nutzerumfrage	20
2.4	Fallstudien.....	22
2.5	Qualitätskriterien von optischen Sensoren.....	23
2.5.1	Übersicht und Qualitätskriterien visuelle Kameras	23
2.5.2	Übersicht und Qualitätskriterien infrarot Kameras	24
2.5.3	Übersicht und Qualitätskriterien LIDAR Laserscanner	27
2.6	Anforderungszuweisung zu Testfeld-Systemkomponenten	28
2.6.1	Anforderungen an eine Hardwarearchitektur	29
2.6.2	Anforderungen an die Software und dem Datenmanagement	31
2.6.3	Anforderungen an Sensoren	34
2.7	Testfeldkonzept.....	35
2.8	Zusammenfassung.....	36
3	Verwandte Arbeiten	38
3.1	Maritime Testfelder	38
3.2	Maritime Informationstechnologien	39
3.3	Multimedia / Automobil Testfelder mit optischen Sensoren	39
3.4	Testfelder für Umgebungs-Überwachungsanwendungen.....	40
3.5	Fusionsarchitekturen für sensorbasierte Experimente	42

3.5.1	Kontextbasierte, adaptive Architektur mit JDL-Modell.....	42
3.5.2	Multi-Agent Architektur mit OODA-Loop-Modell	45
3.6	Datenstrommanagementsysteme	47
3.7	Zusammenfassung und Handlungsbedarf.....	48
3.7.1	Zusammenfassung und Bewertung der verwandten Arbeiten.....	48
3.7.2	Handlungsbedarf.....	49
4	Testfeld-Design.....	50
4.1	Testfeldarchitektur	50
4.2	Physische Netzwerkstruktur / Topologie	54
4.2.1	Physische Netzwerkstruktur	54
4.2.2	Netzwerktopologie	56
4.3	Hardwarearchitektur	57
5	Testfeldsystem - Integration	59
5.1	Optische Sensoren.....	59
5.1.1	Charakterisierung VIS Optiken und Kamerasystem	60
5.1.2	Charakterisierung IR Optiken und Kamerasystem.....	62
5.1.3	LIDAR Laserscanner.....	64
5.1.4	Zusammenfassung optische Sensoren	65
5.2	Hardware.....	66
5.2.1	Energieversorgung.....	66
5.2.2	Schnittstellen	67
5.2.3	Kommunikation	68
5.2.4	Netzwerk.....	69
5.2.5	Zusammenfassung Hardwareintegration	72
5.3	Datenstrommanagement-Framework.....	73
5.3.1	Überblick	73
5.3.2	Datenstrommanagementsystem Odysseus.....	74
5.3.3	Testfeld Datenfusionsmodell für optische Sensoren	80
5.3.4	Server-seitige Software Implementierung.....	84
5.3.5	Client-seitige Software Implementierung.....	87
5.3.6	Sensordaten Metainformation	87
5.3.7	Datenspeichermanagement.....	89
5.3.8	Replay-Modul.....	92
5.3.9	Simulations-Modul.....	92
5.3.10	Zusammenfassung DSMS Integration.....	94

5.4	Testfeldsystem Leistungscharakteristik	97
5.4.1	Übersicht Leistungsmerkmale und Leistungsdatenerhebung	97
5.4.2	Latenz	101
5.4.3	Datendurchsatz	103
5.4.4	Bandbreite im Netzwerkverbund	106
5.4.5	Diskussion DSMS Leistungscharakteristik	107
5.5	Zusammenfassung Testfeldsystem-Integration	108
6	Nutzung und Evaluation des Testfeldes für Umweltlagebilderzeugung	109
6.1	Planung und Ablauf für einen Testfeldeinsatz	109
6.2	Überblick	110
6.3	Studiengbiet und Testfeldausstattung	112
6.4	Anwendungen mittels Umweltlagebilderzeugung	114
6.4.1	Stationäre Anlegeassistenz	114
6.4.2	Mobile Anlegeassistenz	116
6.4.3	Person über Bord Situation	119
6.4.4	Stationäre Umweltbeobachtung	122
6.4.5	Mobile Umweltbeobachtung	124
6.4.6	Replay und Simulationsfunktionalität	126
6.5	Diskussion Umweltlagebilderzeugung, Testfeldevaluation	127
6.6	Zusammenfassung Umweltlagebilderzeugung	130
7	Nutzung und Evaluation des Testfeldes für optische Strömungsmessung	131
7.1	Überblick	131
7.2	Stand der Technik und Forschung	132
7.2.1	Grundlagen LSPIV Messverfahren	132
7.2.2	Grundlagen ADCP-Messverfahren	133
7.3	Einschränkungen von in situ Messverfahren	134
7.4	Studiengbiet und Testfeldausstattung	136
7.4.1	Studiengbiet	136
7.4.2	Testfeldausstattung	138
7.4.3	Erhebung von Referenzmessdaten	141
7.5	Entwicklung eines LSPIV Messverfahrens	144
7.6	Ergebnisse optische Strömungsmessung	152
7.6.1	Meeresoberflächenströmungsgeschwindigkeit	152

7.6.2	Meeresoberflächenströmungsrichtung	156
7.7	Diskussion optische Strömungsmessung, Testfeldevaluation	158
7.8	Zusammenfassung optische Strömungsmessung	161
8	Zusammenfassung und Ausblick.....	162
8.1	Zusammenfassung	163
8.1.1	Analysephase	163
8.1.2	Entwurfsphase	164
8.1.3	Implementierungsphase	165
8.1.4	Test und Evaluationsphase	165
8.2	Ausblick	167
	Anhang A: Implementierung von e-Navigation Services	170
	Anhang B: Detaillierte Anforderungsermittlung	171
	Anhang C: Radialsymmetrische Verzeichnung und intrinsische Parameter... 174	
C.1	Verzeichnung visuelles Objektiv, Typ LM6HC	174
C.2	Verzeichnung IR Objektive	175
	Anhang D: Visuelle Kamera-Objektbetrachtung	176
	Anhang E: Auflösung, Stabilität, NUC, IR-Kamera	177
	Anhang F: IR Kamera-Objektbetrachtung.....	179
	Anhang G: Unsicherheiten LSPIV Verfahren	180
	Literaturverzeichnis.....	181
	Abbildungsverzeichnis.....	202
	Tabellenverzeichnis	210
	Symbole	211

1 Einleitung

Optische Bildsensoren und Bildverarbeitung stellen durch ihre vielfältigen Einsatzmöglichkeiten in naturwissenschaftlichen und technischen Disziplinen ein wichtiges Instrument dar (Jähne 2012). Auch in der zivilen maritimen Umwelt- und Verkehrsbeobachtung kommt Ihnen eine besondere Bedeutung zu. Ob als in situ Sensor, integriert in Beobachtungsplattformen (Watson und Zielinski 2013; Jan Schulz et al. 2016; Prasad et al. 2017), oder zur Fernerkundung, bieten diese Informationen über den Zustand der Umwelt in räumlicher und zeitlicher Dimension, die mit konventionellen Messtechniken unter anderem schwer zugänglich sind. Die Entwicklung und Implementierung neuer Technologien speziell im maritimen Bereich kostet Mühe und Geld und wird erschwert durch oftmals exponierte Lagen und rauen Umweltbedingen. Um die Gesamtentwicklungszeit und damit time to market zu verkürzen, neue Technologien und Sensoren in Testumgebungen rasch zu erproben und die Qualität des endgültigen Produkts sicherzustellen werden daher unterstützende Methoden und Werkzeuge benötigt. In realen Studienumgebungen bietet sich eine verteilte Messstrategie an, um Informationen aus großflächigen Gebieten oder unterschiedlichen Betrachtungsräumen zu erschließen. Dies hat unter anderem zur Folge das sowohl Datenströme und Fusionsansätze in der Lage sein müssen flexibel auf die dynamische Verfügbarkeit verschiedener Sensordaten zu agieren (Nakamura et al. 2007). Im maritimen Forschungs- und Entwicklungsbereich konzentrieren sich derweil unterschiedliche Ansätze entweder auf Anwendungen aus dem Verkehrs- oder Umweltbereich. Daher bietet ein flexibles Testfeld mit universellen Werkzeugen und flexiblen Funktionen, die Möglichkeit unter anderem neue interdisziplinäre Forschungsfragen und Anwendungen zu bearbeiten.

1.1 Motivation

Moderne Informations- und Kommunikationstechnologie birgt das Potential zur Verbesserung von Effizienz und Steigerung der Sicherheit im maritimen Verkehr. Die Arbeitsgruppe deutscher Nationaler Masterplan Maritime Technologien verdeutlicht dies durch ihre Stellungnahme „Effizienter maritimer Transport reduziert den Umwelteinfluss durch die Verminderung von Schadstoffausstoß, ermöglicht

vorbeugende Unfallverhütung und schützt dadurch vor Unfällen mit katastrophalen Folgen für Personen, Umwelt und Wirtschaft (NMMT Arbeitsgruppe 2015)“. Die Verfügbarkeit und Bereitstellung von Informationen über sicherheitskritische und umweltgefährdende Situationen kann hierbei zu Vermeidung von solchen Situationen beizutragen. In kritischen Systemen können Ausfälle entweder das menschliche Leben gefährden oder drastische wirtschaftliche Verluste verursachen. Während diese in der heutigen Gesellschaft eine wichtige Rolle spielen, hat sich ihre Komplexität in den letzten Jahrzehnten drastisch erhöht, da sich immer mehr kritische Systeme in so genannte "sozio-technische Systeme" entwickeln: Menschen werden durch die Bereitstellung und Bewertung von Informationen und Entscheidungen integriert. Durch die Nutzung kooperativer technischer Systeme entstehen Synergien und bieten verteiltes Situationsbewusstsein, die dem Nutzer helfen bei Entscheidungen zu unterstützen und somit die Arbeitsbelastung reduzieren (Murphy 2000).

Ein Beispiel für ein solches System ist der Automobilverkehr: Es entwickelt sich aus rein menschlich bedienten Autos über Autos mit fortschrittlichen Fahrerassistenzsystemen zu einem kooperativen System von Systemen mit Auto-zu-Auto, Auto-zu-Infrastruktur, Auto-zu-Mensch und (noch) Mensch-zu-Mensch-Interaktion. Ähnliche Trends können im maritimen Bereich beobachtet werden und ist unter anderem auch das Ziel von e-Navigation (IMO 2008). E-Navigation bietet dafür ein Rahmenkonzept und eine Strategie für die Entwicklung von maritimen Informationsdiensten zur harmonisierten Sammlung, Integration, Austausch, Präsentation und Analyse von Informationen an Bord und an Land, zur Steigerung der Sicherheit auf See und dem Schutz der Meeresumwelt (Graff 2009; Knagaard und Bentzen 2009).

Das Design neuer unterstützender Systeme erfordert Methoden und Werkzeuge für Test- und Simulationsansätze. Sie sollten auf fundamentalen Experimenten beruhen, um Anwendungen und Konzepte nachweisen zu können, die Entwicklungskosten zu senken und die Zuordnung neuer systemtechnischer Methoden ermöglichen (Hahn 2014). Um geeignete vernetzte Testumgebungen und Produkte und Prozesse zu erproben, adressiert die maritime Wirtschaft in Zusammenarbeit mit Forschungseinrichtungen entsprechende Vorschläge und branchenübergreifende Gesamtlösungen für aktuelle Herausforderungen der digitalen Vernetzung (BMW 2017b).



Abbildung 1.1: Station eines maritimen Beobachtungssystems mit optischen Sensoren, Windsensor, AIS-Empfänger (Automatic Identification System) und Radar für die Erprobung und Demonstration von e-Navigations-Diensten an einer Wasserstraße (Cuxhaven, Deutschland)

Unter anderem werden in der „Maritime Agenda 2025“ (BMWi 2017a) in die Zukunft gerichtete innovative Hafentechnologien angesprochen um z. B. den Verkehr zu optimieren, die digitale Infrastruktur zu verbessern, die stärkere Nutzung der IT in den Häfen und Logistikketten voranzutreiben, sowie auch die Entwicklung innovativer Technologien, welche zur Verbesserung des Umwelt- und Klimaschutzes beitragen.

Daher unterstützt die maritime Industrie und Forschung den Einsatz und die Entwicklung von e-Navigationsdiensten in Form einer integrierten e-Maritime Referenz-Plattform (eMIR) (Hahn und Noack 2016). Diese Plattform umfasst Werkzeuge für die Simulation sowie experimentelle physikalische Testfelder zur Entwicklung, Integration, Erprobung innovativer Technologien, Produkte und Dienste sowie zur nachhaltigen Nutzung der Ergebnisse einzelner Demonstratorvorhaben. Darüber hinaus werden sowohl Logistik als auch die Hinterlandanbindung und die nachhaltige und kompatible Nutzung von marinen Ökosystemen berücksichtigt. Diese

Testumgebungen unterstützen und erweitern u. a. Simulationen mit realen Daten und bieten Dienstleistungen für grundlegende Experimente an. Zu diesen Diensten gehören beispielsweise eine Referenzwasserstraße (Abbildung 1.1), ein mobiles Brückensystem und ein Vessel Traffic Services (VTS) - System (Stasch et al. 2014).

Kohärent dazu bildet das in dieser Arbeit behandelte Testfeld für optische Sensoren eine Plattform, zur Erforschung und Erprobung neuer Anwendungen und optischen Technologien, Sensordatenfusion, Kommunikationstechnik und Datenstromanalyse-Tools. Anwendung findet das Testfeld unter anderem zur Umweltlagebilderstellung von großflächigen maritimen Studiengebieten bspw. zur Erschließung von Hafengebieten oder Offshorebereichen. Dabei besteht das Bestreben eben nicht nur Aspekte aus Verkehr oder Umwelt zu betrachten, sondern das Potential aus multivarianten optischen Informationen zu nutzen um diese Bereiche gemeinsam zu adressieren und Informationen für unterschiedliche Nutzergruppen bereitzustellen. Abbildung 1.2 zeigt übersichtlich die beiden hier in der Arbeit betrachteten Anwendungsbereiche des Testfeldes und ermöglicht dadurch Anwendungsentwicklungen und in situ Experimente zur Erstellung von Umweltlagebildern sowie weiterhin zur optischen Strömungsmessung.

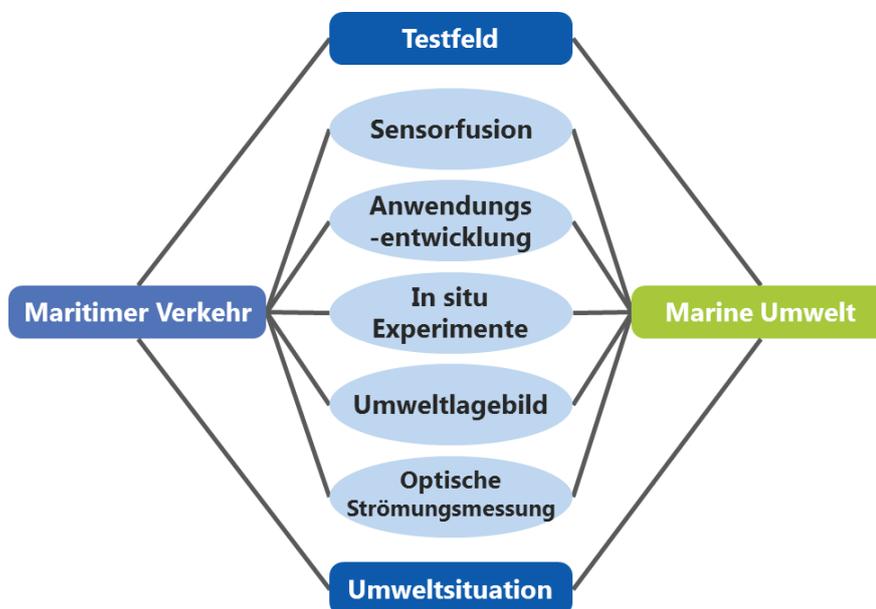


Abbildung 1.2: Anwendungsbereiche und Aufgaben des Testfeldes im Bereich der Umwelt und Verkehrsbeobachtung

1.2 Problemstatement

Informationssysteme und Sensoren tragen zunehmend zu einem besseren Lagebewusstsein bei, schaffen aber zugleich neue Herausforderungen. Immer höher aufgelöste Sensordaten, teilweise Echtzeitdaten wie von optischen Sensoren, erhöhen die zu verarbeitende und zu verwaltende Datenmenge für Informationssysteme enorm. Die technischen Komponenten solcher Systeme verarbeiten Daten von mehreren, heterogenen Sensoren auf verschiedene Weise: Rohsensordaten werden gereinigt und gefiltert, um Merkmale zu erhalten, die kombiniert, angereichert und interpretiert werden, um höhere semantische Ebenen wie erkannte Situationen zu erreichen, die für System- oder Nutzerentscheidungen relevant sind. Somit kann eine ständige und ggf. kurzfristige Beurteilung sowie Bewertung der aktuellen Lage durchgeführt und darauf aufbauende Entscheidungen getroffen werden. Optische Sensoren sind weitverbreitet für Fernerkundungsvorhaben, jedoch stellt die Bereitstellung eines Testfeldes für optische Sensoren in maritimen Umgebungen einige Herausforderungen dar. Im maritimen Verkehrs- und Umweltbereich sollen daher folgende Problemstellungen adressiert werden:

- a) Für viele Anwendungen, u. a. e-Navigation, werden Live-Videodarstellungen der Umgebung aufgrund eingeschränkter Datenübertragung oder fehlender Standards / Protokollen nicht unterstützt (Plass et al. 2014). Ein Testfeld frei und flexibel in maritime Studienbereiche zu integrieren, welche nicht vollständig entwickelt oder mit Kommunikation und Energieversorgung erschlossen sind, erfordert autarke Arbeitsweisen und eine zentrale Verwaltung geographisch verteilter Sensorsysteme. Um Untersuchungen und Erkenntnisse ohne Eingriff oder Störung der Umwelt bzw. technischer Infrastruktur realisieren zu können, fehlen derzeit im zivilen maritimen Bereich daher technische Lösungen für eine Testfeldausstattung zur Verarbeitung und Kommunikation von hochvolumigen Livedaten von optischen Sensoren.
- b) Bei einer Vielzahl unterschiedlicher Testfelder, welche optische Sensoren verwenden, fehlt es oft an Merkmalen, die für den reproduzierbaren Einsatz in F&E Anwendungen erforderlich sind. Diese Features reichen von grundlegenden Anforderungen, wie der flexiblen Sensorkonfiguration während der Laufzeit, bis hin zu der Informationsqualitätsverarbeitung um Unsicherheit zu berücksichtigen (Kuka und Nicklas 2014) oder die Validierung

von Sensorverarbeitungsabfragen um bestimmte Anforderungen zu erfüllen. Da die sensorbasierten Anwendungen häufig auch Darstellung, Modellierung, Simulation, Ausführung und Auswertung beinhalten, sollten diese Aktivitäten in einer geeigneten Sensorverarbeitungsplattform eng miteinander verknüpft werden und im Testfeld für optische Sensoren zur Verfügung stehen.

- c) Der Hafen ist eines der komplexesten maritimen Szenarien für Beobachtungssysteme zur Umweltlagebilderzeugung. Bei hohem Verkehrsaufkommen auf Wasserwegen und in Häfen kommt es häufig zu Gefährdungssituationen, auch bei An- und Ablegemanövern in Schleusen und Häfen müssen Schiffe in schlecht einsehbaren Bereichen manövrieren. In solchen Situationen kann durch die Erzeugung eines Umweltlagebildes, ein verteiltes Situationsbewusstsein für mehrere Nutzer gefördert werden, was die Sicherheit und Effizienz im Verkehrsbetrieb erhöhen kann (Goslin 2008). Darüber hinaus bieten optische Fernerkundungen wichtige Erkenntnisse für den Zustand der maritimen Umwelt (Holman et al. 2003). Ein flexibles Testfeld zur Erforschung und Erprobung von Anwendungen und optischen Sensoren fehlt bislang im maritimen Bereich damit unterstützende „Services“, wie z. B. ein umfassendes Bild der näheren Umgebung, zur Verfügung gestellt werden können oder optische Sensoren gezielt in der Anwendungsfunktionalität für die marine Umweltbeobachtung erprobt werden können.
- d) Information über ozeanographische Oberflächenströmungen sind schwierig zu gewinnen, jedoch für vielschichtige Anwendungen und Nutzergruppen, wie z. B. Modellierung, hydrodynamische Studien, Navigation, Seeverkehr oder Naturschutz von Interesse. Die nahe Oberflächengrenzschicht ist weiterhin für ozeanographische Atmosphärenaustauschprozesse von hoher Bedeutung (Soloviev und Roger Lukas 2014). Während in situ Messungen von Meeresströmungen mittels ADCP-Messsystemen qualitativ hochwertige vertikal aufgelöste Informationen über die Strömungsdynamik liefern, ist diese Messtechnik in deren Leistungsfähigkeit zur Erfassung der oberflächennahen Strömungsverhältnisse jedoch eingeschränkt. Es fehlt derzeit ein geeignetes Messverfahren um, kohärent zu offshore in situ Messverfahren, horizontale Strömungsdynamiken zeitlich hochaufgelöst zu erfassen.

1.3 Zielsetzung, erwartete Ergebnisse und wissenschaftlicher Beitrag

1.3.1 Zielsetzung

Ausgehend von den zuvor beschriebenen Problemstellungen, besteht somit Bedarf an:

- a) einer technischen Lösung für eine Testfeldausstattung zur Verarbeitung und Kommunikation von hochvolumigen Livedaten von optischen Sensoren.
- b) einer Sensorverarbeitungsplattform für optische Sensoren.
- c) einem flexibel einsetzbaren Testfeld zur Erforschung und Erprobung von optischen Sensoren und maritimen Anwendungen.
- d) einem geeigneten Messverfahren um offshore horizontale Strömungsdynamiken zeitlich hochaufgelöst zu erfassen.

Daraus lassen sich im Wesentlichen zwei übergeordnete Ziele ableiten, die in dieser Arbeit erreicht werden sollen:

- I. Die technische Entwicklung eines Testfeldsystems, welches flexible Testfelder für optische Sensoren mit Werkzeugen und Methoden für die maritime Forschung und Entwicklung bereitstellt.
- II. Die Erprobung von Testfeldern in realen Studienumgebungen für Anwendungsentwicklungen zur Erzeugung von Umweltlagebildern und optischer Strömungsmessung.

In diesem Zusammenhang lautet die hier bearbeitete Forschungsfrage:

Wie können Testfelder für optische Sensoren in realen maritimen Studienumgebungen bereitgestellt und für die Umweltlagebilderstellung sowie optischer Strömungsmessung genutzt werden?

1.3.2 Erwartete Ergebnisse

Die zuvor beschriebenen Ziele dieser Arbeit umfassen das Konzept, Design und Implementation eines Testfeldsystems sowie die wissenschaftliche Erprobung von „Testfeldern“, für optische Sensoren in maritimen Studienbereichen, um damit neue Erkenntnisse und Anwendungen zu erschließen, Konzepte nachweisen zu können und Evaluation und Demonstration von „Services“ sowie optischen Sensoren zu unterstützen. Als Anwendung wird die Erstellung von maritimen Umweltlagebildern sowie optische Strömungsmessung vorgestellt. Zum Erreichen der beiden genannten übergeordneten Hauptziele lassen sich diese in kleinere Teilbereiche darstellen um die erwarteten Ergebnisse sowie, wie in den folgenden Kapiteln aufgegriffen, konkrete Anforderungen und Lösungen daraus ableiten zu können.

Die erwarteten Ergebnisse:

Ein Testfeldsystem für die Bereitstellung von Testfeldern für optische Sensoren

Das Testfeldsystem bildet die Grundlage um optische Sensoren zu betreiben, deren Informationen, zu verarbeiten und bereitzustellen. Es umfasst sowohl Hardware als auch Software und stellt Kommunikationskanäle wie auch Schnittstellen für Simulationen zur Verfügung. Das Testfeldsystem berücksichtigt die qualitätsorientierte Bearbeitung von hochvolumigen Datenströmen und individuelle Datenstromabfragen durch ein Datenstrommanagementsystem, autarke Arbeitsweisen sowie eine zentrale Verwaltung. Ein Studienbereich kann durch das Testfeldsystem weiträumig mit optischen Sensoren ausgestattet werden und bildet dadurch ein Testfeld, welches das Studiengebiet zu einem „Forschungsgebiet“ aufwertet. In einem Studiengebiet können mit dem Testfeld in situ Experimente unter realen Bedingungen durchgeführt werden. Ein Testfeld kann dabei stationär als auch mobil, onshore wie auch offshore eingesetzt werden, ist zeitlich uneingeschränkt verfügbar und erweiterungsfähig.

Die grundlegenden Funktionen in einem Testfeld ermöglichen die:

- Onlineerkennung relevanter Situationen,
- Sammlung von Daten und Metainformationen für weitere Analyse und
- Wiederverwendung dieser Daten.

Die Erzeugung von Umweltlagebildern und ein Fernerkundungsmessverfahren für optische Strömungsmessung

Die Anwendung eines Testfeldes im maritimen Bereich bietet die Möglichkeit ein nahes Umweltlagebild auf Basis verteilter optischer Informationen zu erzeugen und mehreren Nutzern unmittelbar zur Verfügung zu stellen. Mit der Anwendung eines Testfeldes können sowohl „Services“ also Dienstleistungen als auch optische Technologien erprobt und validiert werden. Es steht sowohl der Forschung und Entwicklung als auch Anwendern aus dem Verkehrsbereich zur Verfügung.

Die Anwendung eines Testfeldes für die Erstellung eines Umweltlagebildes ermöglicht unter anderem folgende Szenarien zu untersuchen:

- An- und Ablegeassistenz in Häfen und Schleusen
- Umgebungsbild eines Schiffes bereitstellen
- Erkennung von Personen im Wasser mittels optischer Sensoren
- Fernerkundung der Meeresoberflächentemperatur

Die Anwendung eines Testfeldes ermöglicht weiterhin die Entwicklung von Fernerkundungsmessverfahren zur optischen Strömungsmessung in Offshorebereichen, sowie die qualitative und quantitative Betrachtung der Ergebnisse für Langzeitbeobachtungen. In diesen Zusammenhang sollen durch die Nutzung des Testfeldes für die optische Strömungsmessung folgende Fragen beantwortet werden:

- Wie können Videodaten erhoben und verarbeitet werden, die für die LSPIV-Analyse in maritimen Offshoreregionen geeignet sind?
- Gibt es Umwelteffekte, die das LSPIV-Ergebnis beeinflussen und wenn ja in welchem Umfang?
- Stimmen LSPIV-Fernerkundungsdaten mit in situ Beobachtungen überein?

1.3.3 Wissenschaftlicher Beitrag

Diese Arbeit leistet einen Beitrag im Bezug zu den in Kapitel 1.2 aufgeführten Problemstellungen durch die Bereitstellung von Testfeldern für optische Sensoren und deren Applikation und Anwendungsevaluation in maritimen Studiengebieten. Weiterhin beinhaltet diese Arbeit folgende wissenschaftliche Beiträge:

1) *Design und Implementation eines Testfeldsystems für sensorbasierte Forschung und Entwicklung, speziell optische Sensoren im maritimen Bereich.*

Das vorgestellte Testfeldsystem bietet eine Plattform mit flexiblen Schnittstellen und umfassenden Funktionalitäten, um Feldstudien in verteilten Bereichen für Onshore- und Offshore-Anwendungen durchzuführen. Es werden umfassende Aspekte für die Konformität für optische Sensoren berücksichtigt, um zukünftige Entwicklungen und Beobachtungen im maritimen Bereich mit dieser Multiplattform durchzuführen zu können.

2) *Eine datenstrombasierte Architektur für die Erfassung optischer Sensordaten, der Bereitstellung von fusionierten Informationen einschließlich Metainformationen sowie die Bereitstellung dieser Daten für weitere Forschung und Entwicklung.*

Die entwickelte Architektur bietet Werkzeuge um den Aufwand für die Einrichtung, Konfiguration und Analyse von optischen Sensoren und Sensordaten zu erleichtern. Weiterhin können Anforderungen an weitere detaillierte Datenstromentwicklungen für hochvolumige Video-Streaming Dienste als auch die damit erforderlichen Kommunikationstechnologien erforscht werden. Die Entwicklung neuer e-Navigation-Anwendungen (z. B. basierend auf Sensorfusion) erfordert im Allgemeinen konsolidierte Testdatensätze. Diese Aufzeichnungen sind in der Regel nicht verfügbar und müssen in komplexen Messkampagnen erfasst werden. Aufgezeichnete Daten sollten retrospektiv genutzt werden können, um weitere Entwicklungen auszuschöpfen, ohne dass es notwendig ist, teure Szenarien zu wiederholen. Deshalb werden kontinuierlich erfasste reale Live-Sensordaten in einem Rohformat sowie Metainformationen als serialisierte Datensätze für die Validierung und Verifikation neuer Anwendungen für die spätere (Offline-) Analyse für Nutzer des Testfeldes zur Verfügung gestellt.

3) *Flexible Sensorsysteme mit offenen, erweiterbaren Schnittstellen und Sensorfusionsmodell zur Erzeugung von Umweltlagebildern.*

Durch Flexibilität wird auch die zukünftige Erweiterbarkeit und Nutzbarkeit mit neuen optischen Sensoren sichergestellt, bspw. die Unterstützung für verschiedene Datentypen. Die Fusion von verteilten optischen Sensorinformationen bietet Informationen in räumlicher und zeitlicher Dimension und fördert die Integrität bei der Datenanalyse und Verarbeitung. Die Integration von Testfeldern zur maritimen Umweltüberwachung steht weiterhin im Zusammenhang mit anderen interdisziplinären wissenschaftlichen Fragestellungen (die in dieser Arbeit jedoch nicht weiter betrachtet werden) wie der Erzeugung von verteiltem Umweltsituationsbewusstsein und den damit verbundenen erforderlichen Kommunikationsstrategien, um bspw. die Zusammenarbeit zwischen Mensch und Mensch zu verbessern.

4) *Die Bereitstellung und Erprobung von Testfeldern für die Umwelt- und Verkehrsbeobachtung auf Basis verteilter Sensoren.*

Testfelder mit optischen Sensoren ermöglichen Zusammenhänge zwischen Umwelt und Verkehr zu erforschen als auch technologische Bewertungen durchzuführen, z. B. zur Systemoptimierung. Diese bieten damit multifunktionalen Nutzen sowohl im Bereich von Engineering, e-Navigation Anwendungen und auch für die Umweltforschung. Weiterhin ist es notwendig, physikalische und softwaretechnische Infrastrukturen sowie Kommunikationstechnologien zu testen, um Informationen vorzubereiten und zu teilen sowie neue Technologien zu demonstrieren.

5) *Die Entwicklung und Validierung eines Fernerkundungsmessverfahrens für die optische Strömungsmessung in maritimen Offshorebereichen.*

Das in dieser Arbeit entwickelte und validierte Fernerkundungsmessverfahren stellt raum- und zeitaufgelöste hydrographische Informationen von horizontalen Strömungsverhältnissen für z. B. den Schiffsverkehr und die Umweltüberwachung zur Verfügung. Während bisherige in situ Messsysteme nur unzureichende Informationen bereitstellen und in situ Messungen in den meisten Wasserstraßen aufgrund des hohen Verkehrsaufkommens nur örtlich und zeitlich begrenzt durchgeführt werden können.

1.4 Aufbau der Arbeit

Die vorliegende Arbeit umfasst die Konzeption und der Entwicklung eines Testfeldes für optische Sensoren zur Erstellung von maritimen Umweltlagebildern und optischer Strömungsmessung. Die Struktur und Methodik der Arbeit folgt dabei objektorientiert, den Stufen der Entwicklungsprozessphasen (Burghardt 2012) des Testfeldsystems, welche in Abbildung 1.3 veranschaulicht werden.

Ausgehend von der Motivation für diese Arbeit werden im Kapitel 1 wissenschaftliche und technische Fragestellungen für Testfelder im maritimen Verkehrs- und Umweltbereich erörtert, die zu der Beschreibung der Zielsetzung sowie den erwarteten Ergebnissen dieser Arbeit führen. Kapitel 2 umschreibt das Systemkonzept und widmet sich der Ermittlung der Systemanforderungen sowie dem Stand der Technik. Darin werden u. a. Aspekte von maritimen Studienumgebungen und Fallstudien aufgegriffen und funktionelle sowie nichtfunktionelle Eigenschaften des Testfeldes, wie Mobilität, oder Qualitätskriterien der Sensoren betrachtet. Des Weiteren werden in diesem Zusammenhang Anforderungen an die Testfeldarchitektur durch eine Nutzerumfrage ermittelt. Die Anforderungen führen dann zu einem Testfeldkonzept.

Kapitel 3 präsentiert verwandte Arbeiten zum Stand der Wissenschaft im Bezug von Anwendungen, Architekturen und Testfelder für maritime Bereiche und optischen Sensoren. In der folgenden Zusammenfassung wird der Handlungsbedarf identifiziert und die eigenen Ansätze diese Arbeit verdeutlicht. Diese führen dann im Kapitel 4 zu dem Design einer Testfeldarchitektur, der vernetzten Systemstruktur und -topologie sowie einer Hardware. Kapitel 5 beschreibt die Integration von optischen Sensoren, der Hardware sowie der Testfeldarchitektur, in explorative Sensorsystem-Prototypen. Diese werden im Folgenden als Testfelder für Anwendungsstudien eingesetzt. Kapitel 6 präsentiert Anwendungsstudien mit einem Testfeld zur Umweltlagebilderzeugung, um kontinuierlich Sensordaten für unterschiedliche mobile sowie stationäre Szenarien zu verarbeiten und verteilten Nutzergruppen zur Verfügung zu stellen. Teile der vorhergegangenen Kapitel wurden in (Surm et al. 2016) sowie (Rüssmeier et al. 2016; Rüssmeier et al. 2017) veröffentlicht. Das folgende Kapitel 7, beschreibt die Entwicklung und Validierung eines LSPIV Messverfahrens mittels aufgezeichneter Sensordaten zur Fernerkundung von horizontalen Oberflächenströmungen. Teile dieses Kapitels sind in (Rüssmeier et al.) publiziert. Durch die Anwendungsstudien werden die Zielsetzungen dieser Arbeit evaluiert. Eine Zusammenfassung sowie ein Ausblick schließt mit Kapitel 8 diese Arbeit ab.

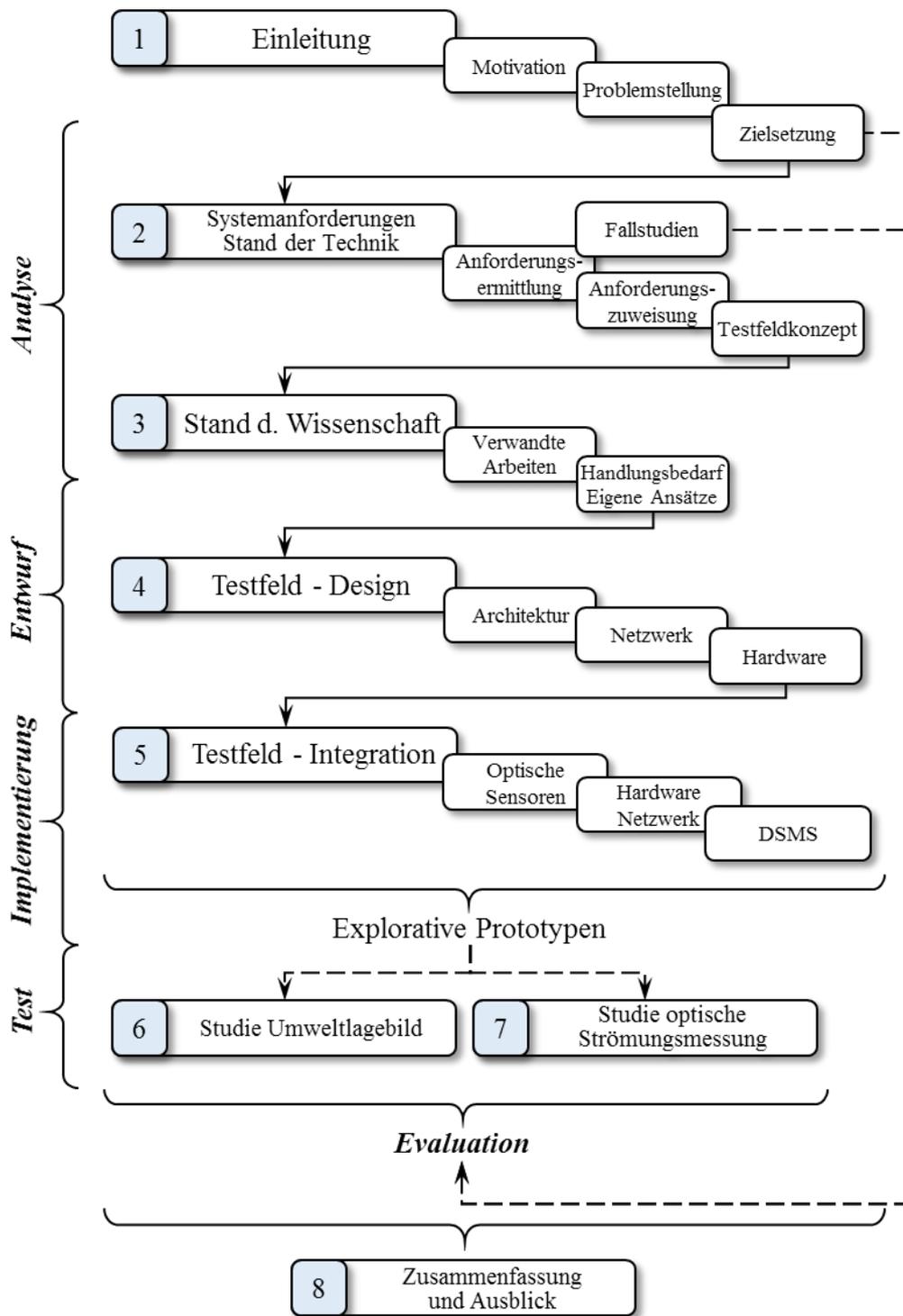


Abbildung 1.3: Struktur und Methodik der Thesis

2 Systemanforderungen und Stand der Technik

Einige grundlegende Anforderungen sowie Funktionalitäten an die Testfeld-Systemarchitektur wurden in dem vorangegangenen Kapitel in der Problemstellung, den Zielen und den wissenschaftlichen Beitrag bereits aufgeführt. Für die explorative prototypische Entwicklung eines Testfeldsystems werden daher die Systemanforderungen u. a. daraus abgeleitet. Ein Requirements-Engineering (Naumann 2013) betrachtet Systemanforderungen systematisch, analog zu anderen „Entwicklungsprojekten“ (Burghardt 2012) und leitet daraus Systemarchitekturen ab. Betrachtet man hierzu die maritime e-Navigation Domäne, in dem das Testfeld unter anderem eingesetzt wird, so stellt die International Maritime Organisation (IMO) für die Entwicklung und das Design zukünftiger e-Navigation Services potentielle Schritte auf, bei der neue Entwicklungen oder Verbesserungen die beabsichtigten Nutzervorteile eindeutig voranstellen (IMO 2008), um anschließend die ermittelten Anforderungen abzuleiten und in eine Systemarchitektur abbilden zu können. Eine Übersicht dazu ist in Anhang A: Implementierung von e-Navigation Services, S:170 aufgeführt. Für das Testfeld sind vordergründig Forschungs- und Entwicklungsvorhaben mit optischen Sensoren im maritimen Umwelt- und Verkehrsbereich vorgesehen. Demnach sollen in situ Experimente auch für die entsprechenden Nutzergruppen, oder in diesem Fall Anwendungsbereichs-Interessen (Umwelt / Verkehr) ermöglicht werden.

Ausgehend von den aufgezeigten Problemstellungen und Zielen in Kapitel 1.2 und 1.3 werden die Anforderungen sowie Lösungsansätze für das Testfeld für optische Sensoren im maritimen Bereich nachfolgend identifiziert. Die folgenden Abschnitte in diesem Kapitel ordnen anschließend die Systemanforderungen (gewünschte Funktionen) den Testfeld-Systemkomponenten zu und betrachten dabei technische Lösungsansätze nach Stand der Technik. Die übergeordnete Architektur des Testfeldes wird darauffolgend entwickelt und das Konzept dargestellt. Abbildung 2.1 zeigt dazu eine Zusammenfassung die einzelnen Entwicklungsschritte.

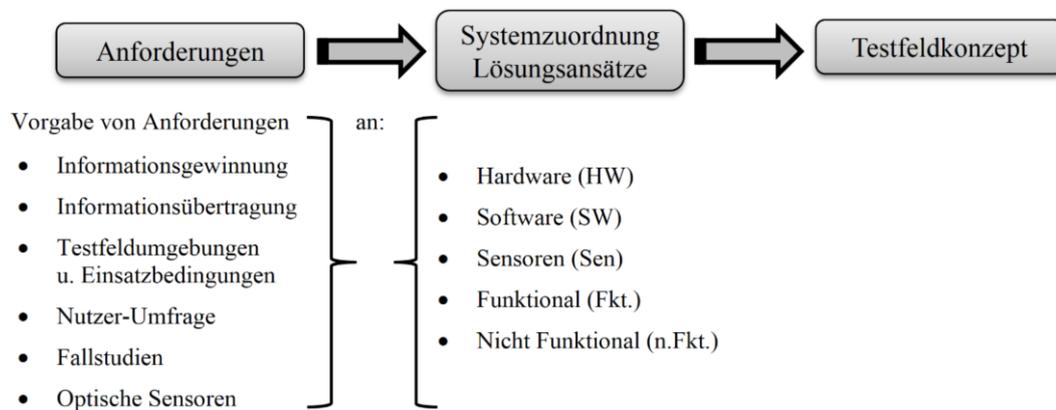


Abbildung 2.1: Schritte für die Entwicklung einer Testfeldkonzepts. Anforderungen werden eruiert, auf Systemkomponenten abgebildet und ein Konzept abgeleitet

2.1 Informationsgewinnung, Übertragung

Um ein Testfeld für optische Sensoren in maritimen Studiengebieten, d. h. sowohl Land- wie auch auf Seeseitig zu betreiben und Informationen an Nutzer bereitzustellen, sind einige Anforderungen zu berücksichtigen. Es werden daher nachfolgend Lösungen betrachtet wie Information gewonnen und übertragen werden können ohne Beeinträchtigung oder Störung der Umwelt bzw. bestehender technischer Infrastruktur. Aus dem maritimen Verkehrsbereich werden dazu entsprechende Schnittstellen sowie Übertragungsmöglichkeiten zwischen Land- und See / Hafen betrachtet.

2.1.1 Informationsgewinnung

Die grundlegende Informationsgewinnung für Beobachtungsanwendungen mit optischen Sensoren auf Basis digitaler Videokameras wird in Abbildung 2.2 dargestellt. Diese beruht (zwar) immer noch auf der Architektur mit drei Basisebenen, Sensor-Ebene, Kommunikations-Ebene und Anwendungs-Ebene, jedoch sind die derzeitigen Sensoren „intelligent“ und stellen teilweise schon prozessierte Daten bzw. semantische Informationen über deren Umwelt zur Verfügung. Der Datenaustausch erfolgt hierbei bilateral zwischen dem Sensor und den Anwender. Das bedeutet der Anwender hat die Möglichkeit gezielt Informationen abzurufen. Weiterhin stehen

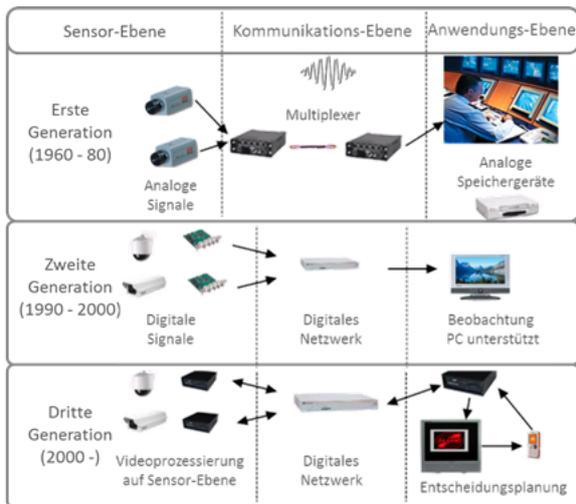


Abbildung 2.2: Entwicklung der grundlegenden Architektur von Video-Beobachtungssystemen. Die aktuelle dritte Generation mit lokaler Video-Prozessierung und bilateraler Kommunikation. Daten stehen mehreren Benutzern zur Verfügung, nach (Foresti et al. 2009)

diese Informationen gleichzeitig mehreren Nutzern über unterschiedliche Schnittstellen zur Verfügung. Diese Architektur ist demnach auch für alle aufgeführten Problemfälle a) - d) anwendbar.

Um ein umfassendes Umweltlagebild und somit höherwertige Information in den Anwendungen bereitzustellen, sollten Informationen von mehreren einzelnen Sensoren jedoch noch fusioniert werden. Ziel der Sensorfusion ist es die Sensordaten zu kombinieren, um auf diese Weise höherwertige Information über einen Prozess zu erhalten. Hierzu sind mehrere Architekturen und Informationsfusionsmodelle verbreitet, eine gute Übersicht dazu gibt Nakamura et al. 2007. Eines der bekanntesten Fusionsmodelle, das JDL-Datenfusionsprozessmodell (Hall, L., David und Llinas 1997) wird im Kapitel 3.5.1 im Verlauf dieser Arbeit detaillierter betrachtet.

Für e-Navigation-Anwendungen besteht bereits mit e-NAV 140 eine Strukturierung und etabliertes Konzept für die Bereitstellung von Informationen „Services“ (IALA 2015). Hier werden Daten mittels Datenerfassungsdiensten von z. B. Umwelt oder Verkehr erhoben und kontextspezifische Informationen mittels Verarbeitungsdiensten erzeugt. Über Datenkoppler gelangen die Informationen zu dem Benutzer und werden mittels HMI-Diensten (Benutzerschnittstelle) dargestellt. Um ein umfassendes Bild der Situation zu integrieren, können Informationen ebenfalls zwischen Nutzern und Systemen sowie System und System mittels Gatewaydiensten ausgetauscht werden.

2.1.2 Informationsübertragung

Für die Nutzung des Testfeldes in großflächigen Gebieten, z. B. in Hafenbereichen, muss eine Datenbereitstellung / Kommunikation zwischen Nutzern an Land und auf See berücksichtigt werden. Für Schiffe und e-Navigation Anwendungen bestehen derzeit auf datenprotokoll- (WARD und Barrie 2010), sowie technischer-Ebene (Valčić et al. 2016) nur begrenzte Möglichkeiten zur Übertragung von hochvolumigen Live-Video-Datenströmen, sowie der Darstellung in Form eines Umweltlagebildes (Plass et al. 2014). Üblicherweise stehen für Schiff- und Landseitige Kommunikation Funk- oder Satellitenkommunikation zur Verfügung, wie in Abbildung 2.3 dargestellt. Diese Technologien sind jedoch aufgrund der limitierten Bandbreite, Übertragungsverzögerungen, lizenzrechtlicher Einschränkungen oder aufgrund hoher Kosten nicht für die Übertragung eines Live-Umweltlagebildes geeignet. Eine ausführliche Betrachtung bestehender Kommunikationstechnologien, bietet hierzu (Rodseth und Kvamstad 2009).

Bestehende, in Hafenbereichen bereits etablierte, Informationstechnologien führt (Heilig und Voß 2016) auf und sind in Abbildung 2.4 gezeigt. Diese Technologien benötigen ebenfalls eine drahtlose Kommunikationsverbindung, mit einfachen Zugang und kostengünstiger Ausstattung. Deshalb setzen viele Häfen großflächige WiFi-Netzwerke mit redundantem Routing und hoher Bandbreite ein. Wobei gemeinsame Router mit verschiedenen Konnektivitäten zu, z. B. LTE mit Backup zu UMTS und GSM, ausgestattet sind. Ein Beispiel hierfür bietet das e-Navigation Dublin Bay Digital Diamond WLAN-Testfeld (Irish Lights) mit bis zu 7 km Radius WLAN-Feld.

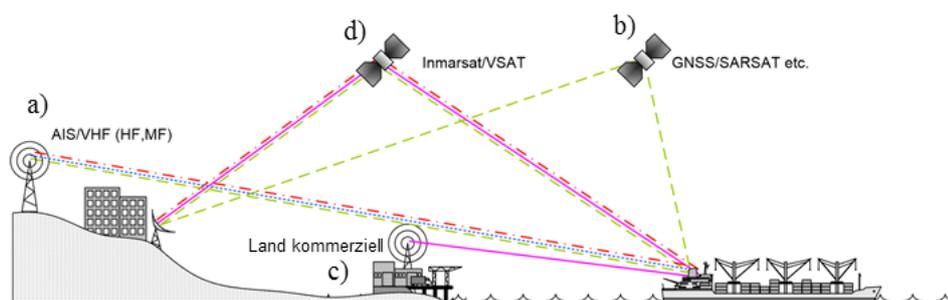


Abbildung 2.3: Kommunikations-Kanal-Klassen nach (Rodseth und Kvamstad 2009)

- a) Land-Schiff sowie Schiff - Schiff Datenlinks (AIS, DSC, VHF, HF, MF)
- b) Satellit (GNSS, EPIRB, LRIT, SSAS, SafetyNET, AISat)
- c) Kommerziell Land-Schiff (GSM, WiMax, WLAN)
- d) Kommerzielle Satelliten-services (Inmarsat, Iridium, VSAT)

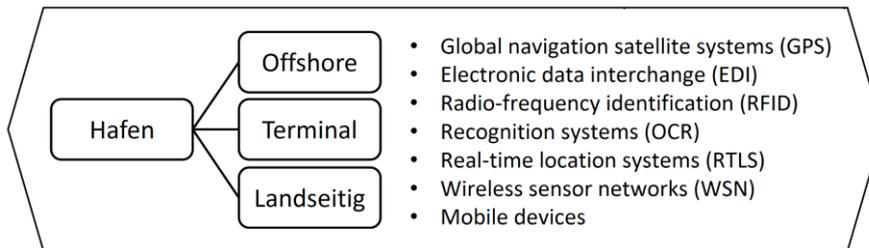


Abbildung 2.4: Klassifizierung von Hafen-bezogenen Informationstechnologien nach (Heilig und Voß 2016)

Eine Lösung für die Kommunikation im Problemstellungsfall a) und c) wäre somit, homogene Netzwerk- und Softwareschnittstellen vom Testfeld für mehrere Nutzer bereitzustellen und parallel zu bestehenden Systemen anzubieten. Typischerweise werden nach Stand der Technik kompatible Streamingprotokolle genutzt, beispielsweise UDP (User Datagram Protokoll) über TCP für hochvolumige „Services“ (z. B. Videostreaming) (Melodia und Akyildiz 2011). Aktuelle kommerzielle Kommunikationstechnologien mit WLAN und optional LTE bieten, wie auch bei anderen technischen Anwendungen gezeigt, eine gute Grundausstattung im geplanten Testfeld und könnten redundant mittels verteilter Systeme ausgeführt werden. Um Nutzer außerhalb des Empfangs- und Sendebereichs des lokalen WLAN einbinden zu können, bestände auch die Möglichkeit mobile Netzwerkknoten, z. B. auf Fähren oder auf Forschungsschiffen einzurichten. Einzelne Testfeldsystemknoten könnten damit stationär wie auch mobil eine Kommunikationsinfrastruktur bereitstellen, die somit auch Erweiterungsfähigkeiten berücksichtigt, in Abbildung 2.5 skizziert. Da die Kommunikationsknoten ebenfalls Anforderungen an z. B. Energieversorgung stellen und verteilt positioniert sind, bieten diese somit gleichzeitig auch Infrastrukturen an, die für den Betrieb von Sensoren genutzt werden können.

2.2 Testfeldumgebungen und Einsatzbedingungen

Als Testumgebungen sind im Allgemeinen reale maritime Umwelt- und Verkehrsbereiche vorgesehen. Hierbei handelt es sich um Onshore- wie auch Offshoregebiete, z. B. Hafenstrukturen, Küstenabschnitte oder Offshorestationen, wie im Problemfall a), c) und d). Um eine räumliche Abdeckung mit Sensoren in einer dynamischen Umgebung mit mobilen Teilnehmern z. B. Schiffe auf Wasserstraßen oder Häfen realisieren zu können und für syntaktische Informationsredundanz zu

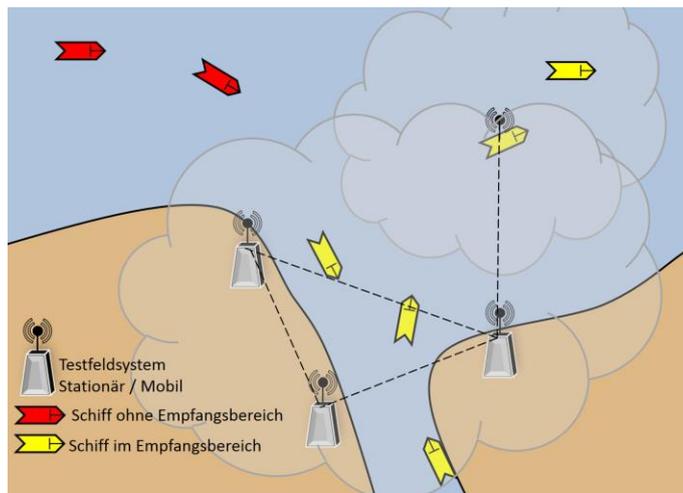


Abbildung 2.5: Konzept verteilter Testfeldsysteme (in Anlehnung an WSN), Kommunikationsinfrastruktur und Sensoren decken großflächige maritime Studienbereiche ab

sorgen sind Informationen von mehreren geographisch verteilten Sensoren erforderlich. In den letzten Jahren haben sich für solche Aufgaben Wireless Sensor Netzwerke (WSN) etabliert. Diese Netzwerke bestehen aus einzelnen verteilten Knoten und nutzen drahtlose Kommunikation. Oft sind diese Sensor-Netzwerkknoten auch in der Lage mit ihrer Umgebung zu interagieren, indem sie physikalische Parameter erfassen oder kontrollieren (Karl und Willig 2005). Unerschlossene Studienggebiete ohne Infrastrukturen erfordern weiterhin autarke Arbeitsweisen und eine zentrale Verwaltung um einen effektiven Betrieb realisieren zu können.

Ein Testfeld soll dementsprechend frei und flexibel in maritime Studienbereiche integriert werden können und Kommunikation zur Vernetzung und Energieversorgung (ggf. mehrere Kommunikations- und Versorgungsmöglichkeiten) bereitstellen. Abbildung 2.5 stellt dazu das Konzept eines Testfeldes mit verteilten Sensorsystemen in Anlehnung an WSN zur geographischen Abdeckung eines maritimen Studienbereichs vor. Als Randbedingung für die erforderliche Hardware für den Einsatz in realen Studienumgebungen ist auch eine geeignete Robustheit gegenüber Umwelteinflüssen zu berücksichtigen. Wie unter anderem auch durch Veröffentlichungen aus dem Umwelt- und Verkehrsbereich bekannt (Pearlman et al. 2014; Selbe 2014; Wehn et al. 2007), müssen: verteilte Datenbereitstellung, Erweiterbarkeit für großflächige Sensornetzwerke, Datenstrom- und Informationsübertragung, Fernzugriff zwischen Onshore- und Offshoreteilnehmern, zentrale Systemadministration, individuelle Benutzeroberfläche, offene Datenschnittstelle und vernetzter, synchronisierter Betrieb abgebildet werden. Als Folge dessen gibt es Herausforderungen für das komplette Testfeld-Framework.

2.3 Nutzerumfrage

Um weitere Anforderungen für das Testfeldsystem zu ermitteln wurde eine Umfrage im Bezug zu sensorbasierten Forschungs- und Entwicklungsplattformen mittels eines Fragebogens an Nutzer aus dem Umwelt- Maritimen- und dem Automobilbereich durchgeführt (Universität Oldenburg, Universität Bamberg und DLR, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.). Dies betrifft überwiegend den geschilderten Problemfall b). Damit können gemeinsamer Probleme und Fehler in bestehenden Sensor-Experiment-Plattformen, die bei der Durchführung von Experimenten und Aufzeichnungen auftreten, identifiziert werden. Die Ergebnisse dazu sind in (Rüssmeier et al. 2017) publiziert. Der Fragebogen ist in drei Teile gegliedert welche in Abbildung 2.6 zusammengestellt sind. Der erste Teil sammelt allgemeine Daten über das Experiment, dessen Aufbau und die verwendete Experimentierplattform, während der zweite und dritte Teil die Experimentausführung bzw. -Auswertung adressieren. Die untersuchten Bereiche dazu beinhalten die notwendigen Schritte um auf Sensordaten auf Softwareebene zuzugreifen, die für die Sensordatenerfassung notwendigen Schritte und auch die notwendigen Schritte zur Überwachung und Verarbeitung von Sensordaten. Der Evaluationsteil untersucht die Archivierungsansätze und Methoden zur Datenauswertung der verwendeten Sensor-Experimentplattformen und identifiziert Sensordatenwiedergabe- sowie Visualisierungsmöglichkeiten. Insgesamt wurden vier verschiedene Sensorexperimente mit dem Fragebogen ausgewertet. Die identifizierten Hauptkritikpunkte an Sensor-Experiment-Plattformen bestehen demnach bei der Protokollierung, der Aufnahme und der Verarbeitung von Live-Sensordaten.



Abbildung 2.6: Inhaltsdarstellung der Nutzerumfrage zur Ermittlung von Anforderungen im Bezug für sensorbasierte Experimentplattformen

Da die meisten Experimente Sensoren von verschiedenen Anbietern verwenden fehlen zentrale Administrations- und Ausführungsmöglichkeiten. Die von dem jeweiligen Anbieter vorgesehene sensorspezifische Software muss manuell gestartet werden und Sensordaten des Experiments werden dadurch in heterogenen Formaten protokolliert. Die Sensordatenverarbeitung - wenn möglich - erfolgt häufig durch das Ausführen von benutzerdefinierten Skripten, welche fehleranfällig, sensorspezifisch und zeitaufwendig zu verwalten sind. Da keine zentrale Ausführungsanwendung zur Verfügung steht welche ein gemeinsames Datenformat verwendet muss die Verarbeitung oder Visualisierung der aufgezeichneten Sensordaten per Sensor erfolgen. Die Möglichkeiten zur Synchronisierung sind dadurch eingeschränkt und Experimente lassen sich nicht reproduzierbar gestalten. Experimente mit langer Laufzeit und hohen Datenaufkommen bereiten weiterhin Schwierigkeiten bei der Archivierung zusammengehöriger Datensätze. Darüber hinaus bestehen oft zwei Konfigurationen von Sensordatenverarbeitungsabfragen - die Erste, um Livedaten zu verarbeiten, - die Zweite, um aufgezeichnete Daten zu verarbeiten.

Zusammengefasst können durch die Nutzerumfrage folgende Anforderungen identifiziert werden:

- i. Adaptive u. flexible Konfiguration von Sensoren während der Laufzeit
- ii. Unterstützung und Erweiterbarkeit für verschiedene Datentypen
- iii. Qualitative Informationsverarbeitung
- iv. Adaptive Verteilung der Datenverarbeitung
- v. Validierung der Datenverwaltung
- vi. Reproduzierbarkeit von Experimenten
- vii. Integrierte Schnittstellen zur Simulation

Diese Punkte stellen Anforderungen und Funktionalitäten an die Testfeldarchitektur und dem Datenmanagement und werden im folgenden Kapitel 2.6.2 (Anforderungen an die Software) detailliert aufgegriffen um entsprechende Lösungsmöglichkeiten bei der Testfeldimplementierung zu berücksichtigen.

2.4 Fallstudien

Das Testfeld soll maritime Umweltlagebilder auf Basis verteilter optischer Informationen erzeugen und mehreren Nutzern unmittelbar zur Verfügung zu stellen. Dadurch kann ein gemeinsames Situationsbewusstsein von z. B. relevanten Situationen gefördert werden und bei Entscheidungen zur Situationsbewältigung unterstützen. Weiterhin werden in den Fallstudien offene wissenschaftliche Fragestellungen aus der maritimen Umweltforschung adressiert, beispielsweise die Entwicklung eines optischen Fernerkundungsverfahrens zur Messung von horizontalen Oberflächenströmungen in Offshoregebieten oder die optische Temperaturmessung der Meeresoberfläche. Im mobilen Schiffseinsatz ermöglicht die Applikation eines Testfeldes ein aktuelles maritimes Umweltlagebild für Forschungskampagnen zu nutzen und ggf. unmittelbar auf veränderte Umgebungsbedingungen zu reagieren oder weiter darauf einzugehen. Weiterhin soll auch die Möglichkeit bestehen unerschlossene Studiengebiete auszustatten und somit neue Informationen aus vormals schwierig zu erschließenden Bereichen für F&E zu gewinnen. Die Eignung des Testfeldsystems soll daher an folgenden Szenarien / Fallstudien evaluiert werden:

- An- und Ablegeassistenz in Häfen und Schleusen
- Umgebungsbild eines Schiffes bereitstellen
- Erkennung von Personen im Wasser mittels optischer Sensoren
- Fernerkundung der Meeresoberflächentemperatur
- Sammlung von Daten und Metainformationen für die weitere Analyse sowie die Wiederverwendung von aufgezeichneten qualitätsannotierten Daten um weitere Anwendungsstudien, z. B. der optischen Strömungsmessung zu ermöglichen.

Detaillierte Beschreibungen zum Hintergrund und wissenschaftlichen Nutzen der Fallstudien sind im Kapitel 6: Nutzung und Evaluation des Testfeldes für Umweltlagebilderzeugung, sowie: Kapitel 7: Nutzung und Evaluation des Testfeldes für optische Strömungsmessung aufgeführt. Formal wurden die Anforderungen aus den Problemstellungen a) - d) sowie den Zielsetzungen I und II analysiert und den einzelnen Testfeld-Systemkomponenten (HW, SW, Sen, Fkt., n. Fkt.) zugeordnet, an dieser Stelle jedoch nicht aufgeführt. Die dezidierte Zuordnung dazu ist im Anhang B: Detaillierte Anforderungsermittlung, S:171 ff. wiedergegeben.

2.5 Qualitätskriterien von optischen Sensoren

2.5.1 Übersicht und Qualitätskriterien visuelle Kameras

Für Fernerkundungsanwendungen sind Kameras weit verbreitet, diese liefern ein situatives Bild der Umgebung (Trivedi et al. 2005). Die Informationen sind dadurch direkt interpretierbar und intuitiv für den Nutzer zugänglich, ohne der Notwendigkeit einer spezialisierten Ausbildung. Übliche visuelle Kameras decken den elektromagnetischen Wellenlängenbereich von etwa 400 - 700 nm, mittels Graustufen- oder Farbsensoren, ab. Für industriell verfügbare digitale Videokameras variieren die Bildauflösungen zwischen wenigen Pixeln bis zu 28 Megapixeln bei einigen High-End-Kameras (Stand 2017). Die meist verwendeten Sensortechnologien sind in der Regel CCD (Charge-Coupled Device) oder CMOS (Complementary Metal- Oxide- Semiconductor) und sind in unterschiedlichen Sensorgrößen für zum Beispiel lichtkritische oder schnelle Anwendungen, mitunter kurzer Belichtungszeit verfügbar. Für eine Übersicht gängiger Arbeitsweisen, sowie praktische Auswahlkriterien für unterschiedliche Anwendungsbereiche, wird an dieser Stelle auf das umfassende Handbuch der Bildverarbeitung (STEMMER IMAGING GmbH 2016), sowie verfügbare Anwendungsbeschreibungen (Basler AG 2013) hingewiesen.

Bei Outdoor-Beobachtungsanwendungen sind oft große Bereiche durch eine Kamera abzudecken. Zur Erstellung von Umweltlagebildern bieten sich weitwinklige Objektive an. Mehrere verteilte Sensoren können somit ein großes Studiengebiet mit überschneidenden Sichtbereichen erfassen. Entsprechend dafür, sind geeignete Optiken mit unterschiedlichen Brennweiten, Objektivauflösungen und -größen verfügbar. Für weiträumige Beobachtungen können omnidirektionale (oder Fisheye) Objektive eingesetzt werden, um eine globale 90° / 360°-Sicht auf ein Gebiet zu ermöglichen. Fisheye-Objektive bieten jedoch aufgrund ihrer Weitbereichsgeometrie eine geringere Auflösung pro Kamerapixel der erfassten Szene. Fast alle Objektive weisen typische radialsymmetrische Verzeichnungen auf die sehr unterschiedliche Größenordnungen annehmen können. Generell führen weitwinklige Objektive zu stärkeren Aberrationen (Litfin 2005). Eine Sonderstellung nehmen Fisheye Objektive, mit ihren zum Teil extremen Verzeichnungswerten am Bildrand, ein. Da die radialsymmetrische Verzeichnung konstruktionsbedingt ist, kann in diesem Zusammenhang nicht von Objektivfehlern gesprochen werden. Für die Auswahl geeigneter visueller Kamera-Objektiv-Kombinationen ist vorrangig die Anwendung

(Aufnahmeentfernung / Objektgröße), die Kamerasensorgöße, die erforderliche abbildende Qualität und nicht zuletzt das Preis-Leistungs-Verhältnis entscheidend (Jähne 2012).

IP-Videokameras sind in den letzten Jahren wegen ihrer einfachen Installation und der leichten Integration in vorhandene Infrastruktur über Netzwerk oder Internet zu einem weitverbreiteten Standard geworden. Diese kommunizieren auf Basis von Standard-Internet-Protokollen und können von beliebig vielen Nutzern abgerufen werden. Ein wesentlicher Nachteil bei der Verwendung von IP-Kameras liegt in der begrenzten Bitrate. Bilder mit höherer Auflösung führen häufig zu einer Bildwiederholrate von weniger als 30 fps (Bilder pro Sekunde). Durch stetige Weiterentwicklungen sind mittlerweile breitbandige (kabelgebundene) Giga-Ethernet-Verbindungen mit Übertragungsraten von mehreren Gbit/s (Gigabit pro Sekunde) verfügbar und in der Lage Streaming-Bilddaten zuverlässig zu übertragen. In dem Zusammenhang hat sich GigE Vision (AIA 2013) als Interfacestandard aus der industriellen Bildverarbeitung seit 2006 weitestgehend etabliert.

2.5.2 Übersicht und Qualitätskriterien infrarot Kameras

Infrarot- (IR) Kameras stellen unabhängig von der Umgebungsbeleuchtung auch Informationen bei Nacht zur Verfügung und werden in unterschiedlichen industriellen Anwendungen, für (marine) Umwelt- und Beobachtungszwecke (Garbe et al. 2004; Hu et al. 2010; Kim und Lee 2014) als auch für die Forschung und Entwicklung von neuen Messverfahren (Minkina und Klecha 2016) eingesetzt.

IR-Kameras mit Mikrobolometer-Array (FPAs) sind die am häufigsten verwendeten Kameras in der Thermografie. Das Arbeitsprinzip jedes Pixels eines Mikrobolometersensor-Arrays wirkt dabei wie ein einzelner widerstandsabhängiger Temperatursensor. Der gesamte Sensor arbeitet dabei unter Vakuum aus thermischen Isolationsgründen. Wärmestrahlung verursacht Absorption und ändert damit die Temperatur der Bolometerbrücke. Eine Temperaturänderung beeinflusst den elektrischen Widerstand des Bolometermaterials aufgrund des spezifischen Temperatur-Widerstandskoeffizienten (TCR). Diese Veränderungen können gemessen und in Intensitätswerte umgewandelt werden. Das zeitliche Ansprechverhalten von Mikrobolometern ist voll kompatibel mit der Szenendynamik für maritime Anwendungen. IR Kameras bieten sowohl eine horizontale als auch eine vertikale räumliche (Temperatur-) Auflösung. Die Rohdaten (Signalspannungen) des

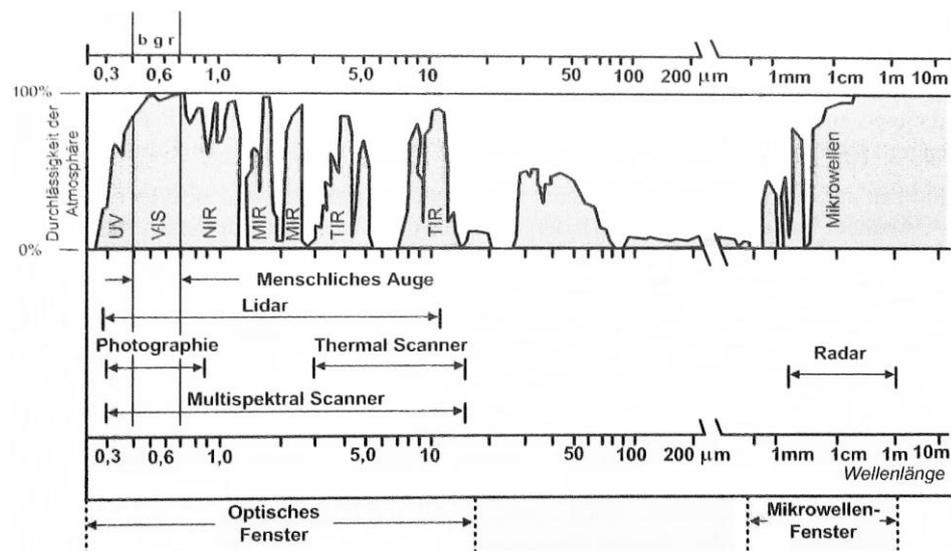


Abbildung 2.7: Elektromagnetisches Spektrum und atmosphärische Fenster. Quelle: (Fischer-Stabel, 2005), s.81

gesamten Sensorarrays enthalten Temperaturinformationen aus der beobachteten Szene aber auch aus Abstrahlungen aus dem Kameragehäuse, sowie des Objektivs und müssen daher radiometrisch korrigiert werden. Um geringe Temperaturdifferenzen zwischen Objekt und Umgebung messtechnisch erfassen zu können müssen Sensoren gekühlt werden (Tempelhahn et al. 2016). Ungekühlte Kameramodelle verfügen im Durchschnitt über eine thermische Empfindlichkeit von ± 50 mK (Kusnierek und Korsath 2014) bei einem Messbereich von -20 °C bis 300 °C. Um gerätespezifische thermische Störungen zu kompensieren, welche sich durch wechselnde Umgebungsbedingungen ergeben (z. B. Kameragehäuse, Rückstreuung innerhalb des Objektivs), verwenden die meisten ungekühlten radiometrischen Kameras einen optischen Verschluss (Shutter) für die Online-Rekalibrierung. Dieser ermöglicht in alternierenden Abständen alle gemessenen Temperaturwerte des Sensorarrays auf eine homogene „Verschluss-Temperatur“ abzugleichen. Manche Modelle verwenden zusätzlich eine interne Gehäuse- sowie Sensorbeheizung um konstante Temperatur-Betriebsbedingungen über dem Umgebungstemperaturniveau zu halten. Aktuelle Ansätze zur Kameraforschung beschäftigen sich auch mit shutterlosen Korrekturverfahren um die Temporauflösung und radiometrische Abbildungsqualität zu erhöhen (Tempelhahn et al. 2016; Nugent et al. 2013), diese sind jedoch für Umweltüberwachungsanwendungen unter rauen Umgebungsbedingungen bedingt einsetzbar. Wie auch bei visuellen Kameras werden

geometrische Verzeichnungen des Bildes durch Objektive verursacht und weiterhin radiometrische Verzeichnungen, (NUC, non uniformity correction), die üblicherweise auf Herstellerseite kalibriert werden.

Für die Umweltbeobachtung / Fernerkundung mit IR-Kameras sind zwei Wellenlängenbereiche mit hoher Transmission der Atmosphäre im elektromagnetischen Spektrum geeignet, 3 - 5 μm (reflektiertes IR) sowie 8 - 14 μm (thermal IR), dargestellt in Abbildung 2.7. Im kurzwelligen IR-Bereich kann das (emittierte) thermische Signal eines Objekts durch reflektiertes Sonnenlicht überlagert werden und sollte daher berücksichtigt werden. Innerhalb des langwelligen IR- Bereichs von 8 - 14 μm , ist nur eine schmale Absorptionsbande von Ozon (O_3) existent, es besteht nur ein geringer Einfluss von Sonnenlicht bzw. externer künstlicher Illumination, so dass Objekte mit geringem thermischen Kontrast unter natürlichen Hintergrund (d. h. wenig Temperaturdifferenz) aufgelöst werden können. Für eine detaillierte Beschreibung zum physikalischen Hintergrund und des Planckschen Strahlungsgesetzes (Planck 1900) wird an dieser Stelle auf nachfolgende Quellen verwiesen: (Luhmann et al. 2013; Schuster und Kolobrodov 2004).

Das elektrische Signal U am Detektor ist nach dem Stefan-Boltzmann-Gesetz:

$$U \sim \epsilon T_{obj}^4 \quad (2.1)$$

Die gemessene Objekttemperatur T_{obj} ist dabei objektspezifisch wellenlängenabhängig $n(\lambda)$ und berücksichtigt die Gerätetemperatur sowie die Hintergrundstrahlung (Optris 2012):

$$T_{obj} = \sqrt[n(\lambda)]{\frac{U - C \cdot T_{amb}^{n(\lambda)} + C \cdot \epsilon T_{amb}^{n(\lambda)} + C \cdot T_{pyr}^{n(\lambda)}}{C_\epsilon}} \quad (2.2)$$

mit

$$U = C [\epsilon T_{obj}^{n(\lambda)} + (1 - \epsilon) \cdot T_{amb}^{n(\lambda)} - T_{pyr}^{n(\lambda)}] \quad (2.3)$$

wobei

- U : Detektorsignal
- T_{obj} : Objekttemperatur
- T_{amb} : Temperatur der Hintergrundstrahlung
- T_{pyr} : Gerätetemperatur
- C : Gerätespezifische Konstante
- ϵ : Emissionsgrad

Der Emissionsgrad ε als Verhältnismaß der thermischen Strahlungen gleicher Wellenlängen von Körpern ist dabei maximal 1 für den idealen schwarzen Strahler. Natürliche Objekte zeigen einen geringeren Emissionsgrad und emittieren weniger Infrarotstrahlung identischer Wellenlängen als ein schwarzer Strahler ($\varepsilon < 1$).

Derzeit hat sich für IR-Kameras noch kein allgemeiner industrieller Kommunikationsstandard zur Bildübertragung etabliert. Für eine erfolgreiche Anwendungsintegration sind bei der Auswahl einer Kamera sowohl Schnittstellen, Bildwiederholfrequenz, herstellereigene radiometrische Videodateiformate, der zu messende Temperaturbereich, die thermische Empfindlichkeit und Stabilität sowie abbildende und radiometrische Verzeichnungen (NUC) zu berücksichtigen.

2.5.3 Übersicht und Qualitätskriterien LIDAR Laserscanner

Neben, thermischen und optischen Technologien ist die Laserfernerkundung ein effizientes, bewährtes Werkzeug das in der Lage ist quantitative Livedaten mit hoher räumlicher Auflösung zur Verfügung zu stellen. LIDAR-Sensoren können mit luft-, bord- oder stationären- Plattformen betrieben werden und sind daher flexibel für Beobachtungsaufgaben und die wissenschaftliche Forschung einzusetzen (Babichenko 2008). Für maritime Anwendungen werden LIDAR-Laserscanner beispielsweise zur photogrammetrischen Vermessung der Umgebung (Szulwic et al. 2015), für Navigationszwecke (Jimenez et al. 2004) oder auch zur Objektdetektion (Kunz et al. 2005) verwendet. LIDAR-Laserscanner sind aktive Sensoren, d. h. diese verwenden eine eigene Lichtquelle z. B. in Form einer Laserdiode um den Umriss der Umgebung in einer Ebene berührungslos abzutasten. Mittels Pulslaufzeitmessung, oft auch TOF benannt (time of flight), des an der Objektoberfläche reflektierten Lichtsignals wird die Entfernung zwischen Sensor und Objekt berechnet. Die Messungen werden für mehrere inkrementelle Raumwinkel (Winkelauflösung) in der Abtastebene mit kurzen zeitlichen Abständen durchgeführt. Die relative Position und Entfernung der Objektoberfläche zum Sensor wird in Form von zweidimensionaler Polarkoordinaten bereitgestellt (SICK AG 2015). Einige relev. Parameter bei der Laserbereichsmessung gehen von den Laserstrahleigenschaften aus wie Laserenergie, Größe, Divergenz sowie die verwendete Wellenlänge und sollten bei der Auswahl berücksichtigt werden. Einige Umgebungsfaktoren können die Messergebnisse beeinflussen. Dazu zählen u. a. Niederschlag, atmosphärische Turbulenzen, Aerosol-Rückstreuung (Nebel, Staub) oder kohärente Flächeneffekte des Objektes (Rückstreuung, Beugung, ...).

2.6 Anforderungszuweisung zu Testfeld-Systemkomponenten

Die vorangestellten identifizierten Funktionalitäten bzw. technischen Betrachtungen können, nach dem die Anforderungen ermittelten wurden, im Weiteren durch unterschiedliche Testfeld-Systemkomponenten (Hardware, Software, Sensoren) abgedeckt werden. Abbildung 2.8 bietet hierfür die Übersicht zur Zuteilung zwischen gewünschter Funktion (Anforderung) und Testfeld-Systemkomponente. Diese Anforderungen werden in den nachstehenden Kapiteln detailliert aufgegriffen und technische Lösungsmöglichkeiten nach Stand der Technik dazu aufgeführt. Funktionale sowie nichtfunktionale Anforderungen sind dabei jeweils in den Testfeld-Systemkomponenten berücksichtigt. Darauf folgend kann hierdurch zielgerichtet ein erstes Konzept der Testfeldarchitektur abgeleitet werden.

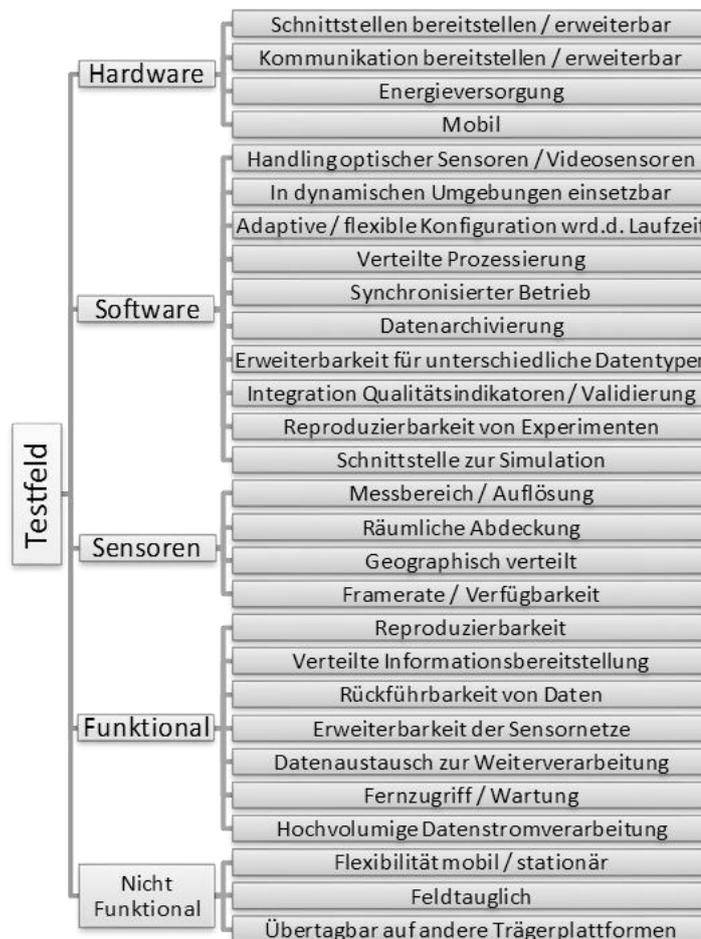


Abbildung 2.8: Übersicht der Systemanforderungen für das Testfeld für optische Sensoren, zugeordnet zu Testfeld-Systemkomponenten

2.6.1 Anforderungen an eine Hardwarearchitektur

Einige Basisfunktionalitäten und Eigenschaften wurden vorangehend identifiziert und können der Hardwarearchitektur zugeordnet werden. Wie in den Testfeldumgebungen und Einsatzbedingungen in Kapitel 2.2 bereits aufgeführt, besteht der Grundgedanke dabei Sensor-Informationen über Wireless-Sensor-Netzwerke (WNS) auszutauschen, um einen Betrieb in realen Studiumgebungen zur Erstellung von Umweltlagebildern zu ermöglichen. Die grundlegenden Komponenten der Hardwarearchitektur eines Testfeld-Sensorknotens bestehen dabei aus Energieversorgung, Kommunikation, CPU (Central Processing Unit), Sensoren und Speicher, wie in Abbildung 2.9 dargestellt.

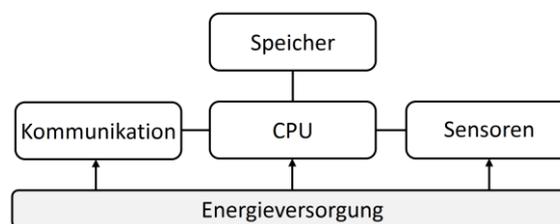


Abbildung 2.9: Grundlegende Komponenten der Hardwarearchitektur eines Testfeld-Sensorknotens

Die folgende Übersicht stellt die angestrebten Funktionen an die Hardwarearchitektur detailliert vor:

Schnittstellen bereitstellen, erweiterbar: Um die Funktion der Datenaufnahme abbilden zu können, sollen Schnittstellen für Sensoren bereitgestellt werden. Diese wären grundlegend paralleler / serieller Natur, erweiterungsfähig bzw. nach heutigem Stand der Technik wandelbar. Ein Beispiel hierfür wären USB zu seriell oder USB zu Ethernet Wandler. Für Videokameras sollte der gängige Standard GigE Vision mit kompatiblen Schnittstellen eingebunden werden. Um Datenverarbeitungsaufgaben realisieren zu können, sind des Weiteren Controllerschnittstellen vorzusehen, um das Testfeld für optische Sensoren als Entwicklungs- und Forschungsplattform betreiben zu können. Beispielsweise integrierte PCs verfügen schon überwiegend über die bereits genannten Schnittstellen und bieten somit die Möglichkeit neue Software leicht zu integrieren. Häufig bieten diese auch eine Schnittstelle für HMI. Für (offline) Simulationen müssen Rohsensordaten und Metadaten aufgezeichnet und später zentralisiert archiviert werden, da eine direkte Rohdatenübertragung während des Feldeinsatzes unnötige Übertragungskapazitäten in Anspruch nehmen würde.

Lokale Speichermöglichkeiten im Sensorknoten wären mit internen Festplatten realisierbar, sowie mit weiteren Kapazitäten durch USB- oder Ethernet-Speicher-Schnittstellen flexibel und schnell erweiterbar bzw. auswechselbar. Somit besteht auch die Möglichkeit für entlegene Gebiete im autonomen Feldbetrieb und ohne weitere Kommunikation große Datenmengen lokal zu gewinnen und belegte Datenträger im Wechsel gegen unbelegte einzusetzen.

Kommunikation bereitstellen erweiterbar: Datenaustausch und Fernzugriff für Wartungszwecke über große Bereiche, z. B. zwischen Onshore- und Offshore-Stationen oder Schiffe muss integriert werden, sowie die Vernetzung zwischen mehreren Testfeld-Sensorknoten erfolgen. Hierfür wurde die Kommunikation mittels WLAN sowie LTE schon in anderen marinen Informationssystemen erprobt und diese Technologien sind weit verbreitet. WLAN bietet eine Grundunabhängigkeit von bestehender Kommunikationsinfrastruktur, da LTE über Sende- / Empfangsstationen externer Provider kostenpflichtig bereitgestellt wird. Aktuelle WLAN-Techniken arbeiten mit MIMO-Technik (Multiple Input Multiple Output) über mehrere Frequenzkanäle im IEEE-802.11 WLAN-Standard (Zheng et al. 2010) mit bis zu 1,3 Gbit/s im 2,5-GHz-Band, bzw. 5-GHz-Band. Durch externe Antennen sowie Richtfunkantennen kann das Netz beliebig erweitert und verteilt werden um größere Kommunikations-Distanzen (mehrere km ohne größere Probleme durch dichten Nebel und Regen) zu überbrücken. Willig (Karl und Willig 2005) beschreibt weiterhin detailliert die Möglichkeiten von Ad Hoc Netzwerken (MANETs, oder auch Multihop-Netz) für WSN einzusetzen. Ein Ad-hoc-Netzwerk bietet die Möglichkeit mobile Teilnehmer in ein Netzwerk einzubinden, ohne manuelle Verwaltung oder Konfiguration. Die Selbstkonfiguration ist von entscheidender Bedeutung für die direkte Kommunikation zwischen einem Sender und einem Empfänger. Für eine weiterführende Kommunikation oder Wartungszwecke besteht auch die Möglichkeit bereits vorhandenes Internet in einen Testfeld-Sensorknoten über LAN oder WLAN einzubinden.

Energieversorgung bereitstellen: Um autarke Arbeitsweisen zu ermöglichen ist eine interne Energieversorgung über Akkumulator und weiterhin über Netzbetrieb notwendig, sowie Vorrichtungen für einen unterbrechungsfreien Akkumulatorwechsel vorteilhaft. Weiterhin bieten regenerative Energiequellen, z. B. Solarkollektoren die Möglichkeit den Betrieb in entlegenen und nicht

erschlossenen Gebieten aufrechtzuerhalten. Nach Stand der Technik kann die Energieübertragung für Sensoren auch über Schnittstellen erfolgen, beispielsweise durch POE (Power Over Ethernet).

Mobilität: Stationärer als auch mobiler Betrieb erfordern anpassbare Kommunikationsverbindungen im Studiengebiet. Weiterhin können unterschiedliche Trägerplattformen (Schiff / Offshorestationen) besser mit kompakter tragbarer Hardware erreicht und als Testfeld ausgestattet werden.

2.6.2 Anforderungen an die Software und dem Datenmanagement

Anforderungen an die Software und dem Datenmanagement wurden u. a. gezielt durch eine Nutzerumfrage aus unterschiedlichen Anwendungsbereichen für sensorbasierte Experimente ermittelt. Wie eingangs dargestellt sollen grundlegende Funktionalitäten zur, 1) Onlineerkennung relevanter Situationen, 2) Sammlung von Daten für die weitere Analyse und 3) Wiederverwendung dieser Daten, ermöglicht werden. Die nachfolgenden Punkte beschreiben detailliert die in Abbildung 2.8 aufgeführten Anforderungen sowie Lösungsansätze nach Stand der Technik:

Handling optische Sensoren / Videosensoren sowie Unterstützung und Erweiterbarkeit für verschiedene Datentypen: Die Software muss in der Lage sein unterschiedliche Datentypen und domänenspezifische Datenmodelle zu integrieren. Zum Beispiel Videodaten und Videoströme, Bilder, Audiodaten oder Daten, die von LIDAR-Laserscanner erzeugt werden. Die Software sollte weiterhin Videoprozessierungsalgorithmen zur Kompression und Encodierung der Datenströme unterstützen um eine effektive Übertragung zu ermöglichen, beispielsweise durch Konnektivität zu Multimedia-Bibliotheken.

In dynamischen Umgebungen einsetzbar, sowie adaptive und flexible Konfiguration von Sensoren zur Laufzeit: Bei der Durchführung von Sensorexperimenten kann sich der Experimentaufbau oft ändern, manchmal sogar während eines Experiments. Neue Sensoren werden zur Laufzeit hinzugefügt, umkonfiguriert oder entfernt. Auch die Integration neuer Sensortypen kann notwendig sein. Testfeld-Sensordaten, die auf bewegten Plattformen (Schiffe, ...) erhoben werden, sind unter Umständen durch Kommunikationseinschränkungen nicht dauerhaft an externer Stelle zugänglich, so dass sich Sensorabfragen im Testfeld an wechselnde Sensorkonfigurationen anpassen müssen.

Verteilte Prozessierung: Bei großflächigen realen Anwendungen kann die Kommunikation zwischen Testfeld-Systemknoten begrenzt oder unmöglich sein. Daher wird eine adaptive Verteilung der Datenerarbeitung benötigt. Verarbeitungsknoten, die große Datenströme erzeugen (beispielsweise bei Videoquellen), könnten Rohdaten lokal vorverarbeiten und nur komprimierte oder semantische Informationen senden. Einhergehend mit der verteilten Prozessierung müssen auch Möglichkeiten zur zeitlichen Synchronisierung mehrerer Testfeld-Systemknoten vorgesehen werden. Internes Datenstrom-Timing sowie ein externes Zeitsignal wären in diesem Zusammenhang verfügbar.

Datenarchivierung: Das Datenmanagement soll aufgezeichnete Daten und statische oder dynamische Metadaten automatisiert, standardisiert und einheitlich zu einem Experiment aufnehmen und zuordnen können. Wichtig ist hier ein Verfahren abzubilden welches sicherstellt das bei unvorhergesehenem Abbruch von Datenaufzeichnungen Datenverluste verhindert werden, beispielsweise bei Systemfehlern, Sensordefekt oder Stromausfall. Um (Video-) Sensordaten bei Langzeitbeobachtungen, z. B. über mehrere Tage, archivieren zu können, müssen automatisierte Aufnahmeinstanzen die Dateigrößen aufteilen um standardisierte Videoformate sowie übergreifende Dateisysteme nutzen zu können. Aufgezeichnete Daten sollten auch retrospektiv genutzt werden können um weitere Entwicklungen auszuschöpfen und zusätzliche Abfragen zu verarbeiten oder neue Anwendungen zu testen, ohne dass es notwendig ist teure Real-Experimente / Szenarien wieder auszuführen.

Informationsqualitätsbearbeitung: Datenqualitätsindikatoren wie Existenzwahrscheinlichkeit, Datenvertrauen, Fehlergrenze etc. werden aus kompatiblen Sensoren integriert oder können aus früheren Sensordaten berechnet werden. In diesem Zusammenhang stellt die Arbeit von C. Kuka (Kuka 2015) detailliert Grundlagen sowie die Implementierung in ein Datenstrommanagementsystem (DSMS) vor. Eine formulierte Anfrage an einen Datenstrom wird dabei durch zusätzliche Quellen erweitert und verwendet um aktuelle Qualitäten von einzelnen Sensorwahrnehmungen kontinuierlich zu bestimmen sowie mit der ursprünglichen Verarbeitungsanfrage zu verknüpfen. Ähnlich wie bei einem Datenbankmanagementsystem (DBMS) (Date 2004) bietet ein DSMS ein High Level Interface (HLI) welches als Kommunikationsdatenstruktur zur Angabe der Applikationsanforderungen dient.

In einem DBMS wird dies typischerweise durch eine SQL-Abfrage (Subscriber Query Language) über API (Application Programming Interface) realisiert, bei der die Applikation eine einmalige Anfrage sendet und die Ergebnisse abrufen. Da die Applikationen im Testfeld einen laufenden Datenstrom benötigen müsste das Framework in einer hohen Frequenz abgefragt werden was zu hohen Datenmengen vom Datenfluss und auch vom Control Flow (die Abfragen) führt. Daher ist ein DSMS auf kontinuierliche Abfragen zugeschnitten (Geesen et al. 2012). In diesen wird die Abfrage nur einmalig an das Datenmanagementsystem gestellt und die Ergebnisse werden kontinuierlich an die Applikation gesendet sobald diese verfügbar sind (ähnlich dem publish-subscribe-Paradigma, manchmal auch als ereignisgesteuerte Architektur bezeichnet).

Validierung der Datenverwaltung und Reproduzierbarkeit von Experimenten:

Da die Sensordatenverarbeitung ein wesentlicher Bestandteil des Systems ist, sollte sie nachvollziehbar und deterministisch sein. Anstatt beliebige Sensordatenverarbeitungsprogramme in einer vollständigen Programmiersprache zu nutzen, bietet ein übergreifendes Verarbeitungsmodell mit einer formal definierten, begrenzten Algebra, z. B. durch ein Operatorenmodell, (Babcock et al. 2002), Werkzeuge mit denen die Sensordatenverarbeitung durch eine Applikationslogik (Krämer 2007) automatisch validiert werden können. Ein Operatorenmodell bildet auch die Grundlage um Fusionsschritte der Informationen zu implementieren. Auch müssen Experimente reproduzierbar sein, so dass die gleiche Datenverarbeitungs pipeline des ursprünglichen Experiments für Wiederholungen wiederverwendet werden kann. Für Experimentdaten, die in realen Umgebungen durchgeführt werden, müssen Zeit- sowie Ortsinformationen eingebettet werden, um eine Rückverfolgbarkeit zu ermöglichen.

Verknüpfung von Simulation: Da die Erforschung von sensorbasierten Anwendungen, Simulation, Ausführung und Evaluation beinhaltet, sollen diese Aktivitäten eng miteinander verknüpft werden. Neben der Reproduzierbarkeit von Experimenten müssen Simulationsumgebungen in die Architektur durch eine Schnittstelle integriert werden können. Die Simulationsschnittstelle stellt eine Eingabe für beispielsweise simulierte, archivierte oder modifizierte Daten oder von verschiedenen Diensten zur Verfügung. So kann das Umweltlagebild für sicher simulierte Szenarien oder Test- und Trainingszwecke genutzt werden.

2.6.3 Anforderungen an Sensoren

Messbereich / Auflösung: Für die Applikation in der Umwelt- und Verkehrsbeobachtung sind visuelle Kameras mit hohem Auflösungsvermögen > 2 MPix Stand der Technik. Für IR-Mikrobolometer-Kameras ist ein Messbereich von $-20^\circ > 120^\circ$ (abhängig von Mikrobolometermaterial) mit 0,05 K Temperatureauflösung verfügbar und für die Umweltlagebilderstellung vorzusehen. Der Messbereich mobiler kompakter LIDAR-Scanner beträgt im Mittel 50 m Radius mit einer Winkelauflösung von $0,5^\circ$ und kann als Grundausstattung im Testfeld verwendet werden. Von den Sensoren sollten Metadaten für qualitätsorientierte Datenverarbeitungen bereitgestellt werden.

Räumliche Abdeckung und geographisch Verteilt: Einen Planungsansatz für die Auswahl der Sensorpositionierung im Raum, bei denen möglichst viele Punkte auf dem Boden sichtbar sind, beschreibt u. a. (Lee 1991). Die topographische Fläche wird dabei durch einen Satz von Punkten gebildet und mit einem Minimum an Beobachtungspunkten mittels eines zusammenhängenden triangulierenden irregulären Netzwerks (TIN) auf einem Gelände abgebildet. Der Ansatz ein Modellgitter (Gitterzellen) auf eine Fläche oder im Raum abzubilden ist heutzutage bei vielen Simulations- und Modellierungswerkzeugen, z. B. in CAD oder GIS-Programmen, bereits integriert und wird für unterschiedliche technische oder Umweltsanwendungen eingesetzt. Für eine weiträumige und umfassende Beobachtung der Umwelt- und Verkehrssituation sollten mehrere elektrooptische Sensoren mit unterschiedlichen elektromagnetischen Empfindlichkeiten sowie Arbeitsweisen (scannend / abbildend) verwendet werden. Dadurch könnten mögliche Umgebungsinterferenzen minimiert, als aber auch multivariante Daten für die Umwelt- und Verkehrsbeobachtung genutzt werden. Um eine räumlich überschneidende, vorderseitige / rückseitige Sichtabdeckung zu erhalten, bieten weitwinklige Objektive, z. B. mit 90° Öffnungswinkel oder Fish-Eye Objektive mit $\sim 180^\circ$ Öffnungswinkel einen weiten Sichtbereich und können im Testfeld verwendet werden.

Framerate / Verfügbarkeit: Sensordaten sollen mit einer geeigneten räumlichen / zeitlichen Aktualität vorliegen (Bildwiederholfrequenz min. 10 Hz) um ein Live-Umweltlagebild zur Verfügung stellen zu können. Die Verfügbarkeit (Tag / Nacht) von Informationen aus einer beobachteten Szene sollte mit elektromagnetischer Empfindlichkeit im VIS- und IR-Bereich der Sensoren aufrechterhalten werden.

2.7 Testfeldkonzept

Im Folgenden wird ein Testfeldkonzept vorgestellt, hierdurch bietet sich die Möglichkeit eine Funktionsweise zu skizzieren und im Weiteren verwandte Arbeiten dahingehend zu reflektieren. Das Schema in Abbildung 2.10 zeigt, wie bereits eingangs vorgestellt, die drei Ebenen von Sensor, Datenstrom (über Kommunikation) und Anwendung. Die Informationsgewinnung beginnt an der Sensor-Ebene, wobei die Funktionalitäten der Hardware, dabei den (verteilten) Sensorsystemknoten zugeordnet werden. Diese bieten entsprechende Schnittstellen für Sensoren und stellen Daten zur Verfügung. Sensoren aus der Sensor-Ebene können über ein Datenstrommanagement aus den Sensorressourcen ausgewählt und weiterverarbeitet werden. Zum Beispiel mittels Datenfusionsprozess als semantisches Modell der Umgebung bereitgestellt werden. Optional können Daten / Szenarien auch gespeichert werden und stehen für die Wiederverwendung zur Verfügung. Dem Datenstrommanagement sind hierbei die beschriebenen Funktionen der Software und des Datenmanagements zugeordnet. Über das Datenstrommanagement stehen Informationen für Anwendungen zur Verfügung, z. B. als Umweltlagebild. Alternativ können Daten direkt aus dem Datenbestand für weitere Applikationen oder proprietäre Software verwendet werden, beispielsweise für Entwicklungen die keinen kontinuierlichen Datenstrom benötigen.

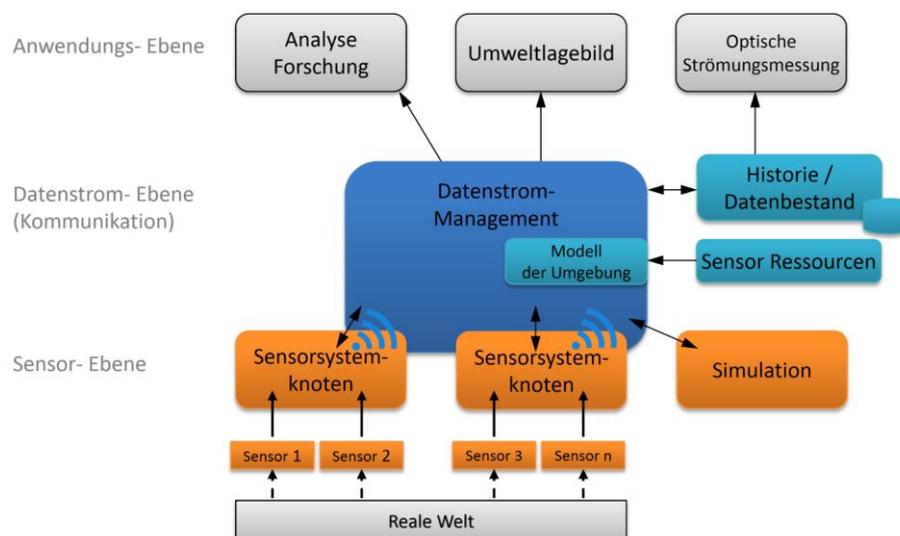


Abbildung 2.10: Schematische Übersicht des Testfeldkonzepts mit Sensor-, Datenstrom- und Anwendungsebene, auf Basis verteilter optischer Sensoren

Das konzeptionierte Testfeld, dessen Funktionen und Anwendungen sollen an dieser Stelle kurz zusammengetragen werden:

Das in dieser Arbeit behandelte Testfeld für sensorbasierte Forschung und Entwicklung mit optischen Sensoren (in dieser Arbeit dargestellt im maritimen Bereich) beinhaltet Technik für einen autonomen Betrieb und zur Vernetzung als WSN. Weiter auch Kommunikationstechnologie sowie Sensordaten Fusions- und Datenstromanalyse-Tools zur Umwelt und Verkehrsbeobachtung in Form von Umweltlagebildern auf Basis geographisch verteilter optischer Sensoren.

Das Testfeld integriert die Erfassung, Aufzeichnung und Wiederverwendung von Sensordaten und stellt Schnittstellen für Simulationsumgebungen bereit. Komplette real durchgeführte Szenarien sind dadurch offline verfügbar und wiederholbar. Durch das Testfeldsystem sollen (maritime) Studiengebiete als mobiles sowie stationäres Testfeld ausgestattet werden, um Informationen zu sammeln und neue Anwendungen sowie optische Technologien in realen Umgebungen erproben zu können. Live-Sensordatenströme sollen hierfür adaptiv hinzugefügt werden können und kontinuierlich, qualitätsorientiert verarbeitet werden um Informationen für unterschiedliche Anwendungen sowie mehrere Nutzer bereitzustellen.

2.8 Zusammenfassung

In diesem Abschnitt der vorliegenden Arbeit wurden die Systemanforderungen an das Testfeld anhand unterschiedlicher Betrachtungsweisen zusammengestellt. Im Kapitel 2.1 wurde gezeigt auf welche Art Informationen gewonnen und über entfernte Strecken kommuniziert werden können. Hierdurch bieten sich auch Lösungen im Bezug zu den Anforderungen aus dem maritimen Studienbereich. Anhand der Testfeldumgebungen und Einsatzbedingungen in Kapitel 2.2 wurden bestehende Lösungen anderer Informationstechnologien aufgegriffen sowie das Konzept verteilter Sensorknoten im WLAN-Netzwerk vorgestellt.

Einige Anforderungen an die Testfeldarchitektur wurden durch eine Nutzerumfrage in Kapitel 2.3 aufgezeigt. Die identifizierten Hauptkritikpunkte an Sensor-Experiment-Plattformen bestehen demnach bei der Protokollierung, der Aufnahme und der Verarbeitung von Live-Sensordaten. Hierzu wurden entsprechende Lösungsansätze und bereits vorhandene und erprobte Teillösungen für die Datenverarbeitung und des Datenmanagements betrachtet.

Anschließend wurden Arbeitsweisen sowie Qualitätskriterien von optischen Sensoren in Kapitel 2.5 vorgestellt und damit die Grundlage für das Verständnis von Messergebnissen in den folgenden Anwendungsstudien gegeben. Darüber hinaus wurden die grundlegenden Parameter verschiedener optischer Sensoren vorgestellt, die für eine erfolgreiche Auswahl und Anwendungsimpementierung berücksichtigt werden sollten.

In Folge dessen wurden in dem Kapitel 2.6 die identifizierten Anforderungen des Testfeldes den Testfeld-Systemkomponenten Hardware, Software und Sensoren zugeordnet und technische Lösungen nach Stand der Technik präsentiert. Diese Zuordnung ermöglicht eine Unterteilung in Module mit entsprechenden Schnittstellen und kann bei der späteren Implementierungsphase des Testfeldsystems aufgegriffen werden.

Abschließend wurde ein Konzept der Testfeldarchitektur in dem Kapitel 2.7 vorgestellt, welches die Funktionsweise des Testfeldsystems mit den Ebenen von der Sensoranbindung über dem Datenmanagement (Kommunikation) bis zur Applikation skizziert. Die identifizierten Funktionen und Anwendungen wurden darauffolgend abgebildet und zusammengetragen.

Zusammen mit den detailliert beschriebenen Funktionalitäten in diesem Kapitel und dem skizzierten Testfeldkonzept können im Folgenden nun verwandte Arbeiten im Bezug zu den Problemstellungen, Funktionalitäten und der Arbeitsweise begutachtet werden, um Forschungs- und Entwicklungspotenziale zu identifizieren und den Handlungsbedarf dieser Arbeit damit aufzuzeigen.

3 Verwandte Arbeiten

In diesem Kapitel werden verwandte wissenschaftlich Arbeiten aus unterschiedlichen Bereichen von Testfeldern, Informationstechnologien und Fusionsmodelle aufgezeigt.

3.1 Maritime Testfelder

Ein Beispiel für Verkehrsbeobachtungen in kleinen Wasserstraßen bietet ARGOS¹ (Automatic & Remote GrandCanal Observation System). ARGOS ist ein Wasserverkehrs-Navigations-Kontrollsystem. Dieses System basiert auf einer Gruppe von fest installierten Sensoren und Kameras, die strategisch auf 14 öffentlichen Gebäuden entlang des Canal Grande (Venedig) positioniert sind. Die Standorte sind in einer Netzwerkstruktur zusammengefasst und werden zentral weiterverarbeitet. Das System stellt Informationen für mehrere Nutzer über die Verkehrsdichte bereit (Bloisi und Iocchi 2009).

Ähnliche Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten für Schiffsnavigation mit einem speziellen Fokus auf Verfahren und Anwendungen unter Nutzung neuer bzw. erweiterter GNSS- Dienste (global navigation satellite system) sind in einem Testfeld für e-Navigation in Rostocker Hafen bekannt (Noack et al. 2015). Wie eingangs erwähnt, besteht eine Plattform eMIR² (eMaritime Referenz Plattform) mit serviceorientierter Forschungsinfrastruktur in Form von physikalischen Testfeldern in der deutschen Bucht für in situ Experimente. Sowie eine Simulationsumgebung zur Erforschung neuer technischer Lösungen, menschliches Design, Überprüfung und Validierung, Demonstration und Umweltüberwachung (Hahn und Noack 2016).

Ein weiteres Testfeld für maritime Studien und Umweltbeobachtung, das Dublin Bay Testfeld (Irland) (Irish Lights), wird u. a. für die Erprobung von WLAN-Kommunikation in Hafengebieten und zwischen Bojen genutzt. Weiterhin auch für Umweltfragestellungen durch WSN mit Datenuplink zu einer Cloud von stationären in situ Multiparametersonden mit Trübungssensor und CTD (Leitfähigkeit, Temperatur, Druck), sowie visuelle Videodaten des Bereichs der in situ Messungen. Hierbei werden die Daten jedoch vorrangig gesammelt und im Nachhinein verarbeitet, um Assoziationen der in situ Daten mit dem Schiffsverkehr zu erkennen (Zhang 2015).

¹ www.argos.venezia.it

² <http://www.emaritime.de>

3.2 Maritime Informationstechnologien

Eine Reihe von Hafenanlagen sind heutzutage mit Videoüberwachungssystemen ausgestattet. Die meisten dieser Systeme werden post-factum verwendet, um bspw. sicherheitskritische Ereignisse zu rekonstruieren. Oft werden für die gleichzeitige Überwachung zahlreicher Video-Feeds Personen benötigt um Ereignisse an weitere Entscheidungsträger weiterzugeben. Dieser Prozess ist dabei relativ ineffektiv und benötigt viel Zeit bis eine Handlung für eine Situationsentschärfung ausgeführt wird. Unterschiedliche bestehende Informationssysteme (Heilig und Voß 2016; Attia 2016) in Häfen und dessen angrenzenden Bereichen in zivilen Anwendungen werden für effiziente Logistik oder für eine optimale Auslastung bestehender Hafenressourcen eingesetzt. Diese Systeme sind für Forschungs- und Entwicklungsvorhaben begrenzt zugänglich. Der Einsatz optischer Sensoren wie beispielsweise Kamerasysteme werden in diesem Zusammenhang eher zur Sicherung der Infrastruktur oder OCR (Optical Character Recognition) Containerklassifizierung eingesetzt.

Es gibt weiterhin mehrere Forschungsaktivitäten im Zusammenhang mit Videoüberwachung der maritimen Umwelt, diese betrachten jedoch kein Testfeld, sondern (teilweise offline) Bilderkennungsalgorithmen aus mehreren Videoquellen und manchmal die Erweiterung mit anderen Sensordaten (Bloisi et al. 2017; Gupta et al. 2009; Pires et al. 2010).

Für optische Strömungsmessungen in maritimen Bereichen bestehen keine Testfelder oder Studien zum derzeitigen Zeitpunkt. Eine Studie beschreibt eine installierte Anwendung auf einer Brücke mit zwei VIS-Kameras in einem gezeitenbeeinflussten Flussbereich des Danshui River (Taipei, Taiwan) (Bechle et al. 2012).

3.3 Multimedia / Automobil Testfelder mit optischen Sensoren

Es bestehen einige Testfelder für die Erforschung von Wireless Multimedia Sensorknoten und optischen Sensoren mit Fragestellung im Bereich der Robotikautomation, Energieeffizienz, Vernetzungsmöglichkeiten und unter anderem Lagebilderstellung aus verteilten Ressourcen (Akyildiz et al. 2008; Melodia und Akyildiz 2011; Yick et al. 2008; Rawat et al. 2014). Diese Systeme sind jedoch nicht für die Live-Umweltlagebilderstellung in großen maritimen Studiengebieten ausgelegt und eher als Testfelder für Indoor-, teilweise Outdooranwendungen konzipiert.

Fragestellungen zur Integrierung und Fusionierung heterogenen Sensoren werden im Verkehrs- und Automobilbereich ebenso betrachtet. Hierbei handelt es sich meistens nicht um verteilte Systeme, sondern um ein Netzwerk von Sensoren und eingebettete Systeme. ANTBED³ (Alternate Navigation TestBED) stellt in diesem Zusammenhang ein Software-Testfeld für Multi-Sensoren zur optischen Navigation zur Verfügung, welches sowohl auf Fahrzeugen und Flugzeugen erprobt worden ist (Touma et al. 2010). Hauptsächlich wird ANTBED für Datamining verwendet mit Unterstützung eines Missionsplaners und homogener (Missions-) Datenablagestruktur. Live Datenübertragungen werden außerhalb des lokalen Systems nicht berücksichtigt.

3.4 Testfelder für Umgebungs-Überwachungsanwendungen

Ein bekanntestes Testfeld für Überwachungsanwendungen mit optischen Sensoren wurde bereits 2000 von Collins et al. beschrieben: DARPA's (Defense Advanced Research Projects Agency) VSAM⁴ Projekt (Video Surveillance and Monitoring). Das Testfeld demonstriert ein verteiltes Netzwerk von stationären Videosensoren als Multikamera-Überwachungssystem (drei verteilte Kameras über eine Fläche von etwa 0,4 km auf einem Universitätscampus). Die Systemarchitektur besteht aus einer Zentrale, die Videodaten über Ethernet von mehreren entfernten Sensorverarbeitungseinheiten empfängt und zentral verarbeitet. Es ist als end-to-end Multikamerasystem dafür ausgelegt automatisch Daten zu sammeln und als Live-Informationen in einem Geo-Standort-Modell der Umgebung, über ein Benutzerinterface mit grafischer Steuerung (GUI), einen einzelnen Bediener zur Verfügung zu stellen.

Ein Tool mit Unterstützung zur Datenfusion von u. a. optischen Sensoren, wurde mit Knight entwickelt, (DARPA) (Shah et al. 2007). Nach umfangreichen Weiterentwicklungen wurden mehrere heterogene optische Sensoren sowie Schnittstellen für weitere Sensoren (z. B. Ampelsignale, GPS, AIS, RFID) und ein GUI hinzugefügt. Eine Variante ist als stationäres Testfeld für maritime Überwachungsanwendungen im Hafen von Florida installiert (Rasheed et al. 2008). Das System unterstützt hochauflösende Kameras über IP-Netzwerk und stellt Live-

³ <http://code.google.com/p/functionalnavigation/>

⁴ <http://www.cs.cmu.edu/~vsam/OldVsamWeb/vsamhome.html>

Video-Fenster für ausgewählte Regionen sowie eine Geobrowser GUI zur Verfügung. Eine detailliertere Architektur ist nicht bekannt.

SIMONE⁵ (Ship Infrared Monitoring, Observation and Navigation Equipment), bietet ein voll integriertes Überwachungssystem für Schiffe auf Basis elektrooptischer (EO) Sensoren mit mehreren ungekühlten IR-Mikrobolometern im langwellenlangen 8 - 14 μm IR-Band (Künzner et al. 2012). Durch die Verteilung mehrere Sensoren auf dem Schiff soll ein Panoramablick der Umgebung ermöglicht und bereitgestellt werden. Das System wird über eine Operatorzentrale bedient. Es gibt auch ähnlich ausgerichtete Anwendungsstudien zur Erforschung der Abbildungsleistung von EO- Sensoren für maritime Anwendungen auf mobilen Plattformen (Dijk et al. 2014).

AMASS (Autonomous Maritime Surveillance System⁶) besteht aus einer Reihe von drei (testweise) installierten Bojen, die vor einer Küste positioniert werden können. Diese sorgen für eine umfassende Abdeckung von Hoheitsgewässern (Grenzsicherung). Jede Boje ist mit aktuellen IR-Kameras und akustischen Sensoren ausgestattet und arbeitet offshore autonom. Die Bojen verfügen über erneuerbare Energiequellen (Solar) sowie direktionale Kommunikation zu einer Leitstelle am Ufer. Akustikdaten und einzelne IR-Bilder sollen in diesem Aufbau übertragen werden und an Land mit weiteren Informationen von AIS (Automatisches Identifikationssystem) und (Flugzeug-) Radar, zu einem probabilistischen Objektmodell fusioniert und über ein Lagebild an einen Nutzer bereitgestellt werden. Live-Datenverarbeitungen von Videodatenströmen sind aufgrund geringer Rechenleistung und begrenzter Kommunikationsbandbreite der verteilten Bojen nicht vorgesehen (Orlov et al. 2012).

Durch die spezielle Ausrichtung dieser vorgestellten Systeme und verwandten Arbeiten ist eine freie, zivile wissenschaftliche Nutzung bedingt möglich. Wie diese Arbeiten aufzeigen, besteht jedoch ein Bedarf an der Erforschung und Entwicklung von Testfeldsystemen um unterschiedliche Anwendung testen zu können. Daher bietet diese Arbeit mit dem vorgestellten Testfeld für optische Sensoren, einen Beitrag für die Forschung und Entwicklung und ermöglicht dadurch Studien und Techniken zur Erprobung von Anwendungen in zivilen Kontext voranzubringen.

⁵ <http://www.diehl.com/de/diehl-defence/produkte/sensor-sicherheitssysteme/ueberwachung-und-aufklaerung/simone.html>

⁶ <http://www.amass-project.eu/amassproject/content/index>

3.5 Fusionsarchitekturen für sensorbasierte Experimente

Im Folgenden werden verwandte Arbeiten zu Testfeldarchitekturen und Modelle zur Informationsfusion (IF) mit maritimem Anwendungshintergrund für die Umweltlagebilderstellung vorgestellt. Überwiegend sind die Anwendungen dem maritimen Verkehrsbereich zugeordnet, Umweltfragestellungen werden nicht adressiert. Die verwandten Arbeiten geben einen Überblick wie verteilte Informationen fusioniert werden und zeigen teilweise parallelen zu dem vorgestellten Architekturkonzept dieser Arbeit, mit verteilten Sensorknoten und adaptiven Konfigurationsmöglichkeiten.

3.5.1 Kontextbasierte, adaptive Architektur mit JDL-Modell

Um ein Netzwerk von Sensoren und mehrere Sensorinformationen in ein maritimes Lagebild zu vereinigen, werden auch allgemeine Ansätze für kontextbasierte, adaptive Architekturen mit Möglichkeiten zur Informationsfusion von Sensordaten vorgeschlagen (Garcia et al. 2011; Snidaro et al. 2015). Durch eine Sensordatenfusion sollen Informationen kombiniert werden, um auf diese Weise höherwertige Information zu erhalten. Das Fusionsmodell berücksichtigt dabei die Eigenschaften aller heterogenen Datenquellen und eine dynamische Repräsentation der kontextuellen Information mit der Hilfe von Fusions-Ebenen. Die Ebenenstruktur der nachfolgend aufgeführten verwandten Arbeit folgt dem JDL-Fusionsmodell⁷, welches in Abbildung 3.1 dargestellt ist, sowie einem Fusionsframework von (Llinas 2010). Im Folgenden wird eine kurze Übersicht auf das JDL-Datenfusionsprozessmodell gegeben.

Das JDL-Datenfusionsprozessmodell ist ein konzeptionelles und funktionsorientiertes Modell mit bis zu 5 Stufen, welches Prozesse, Funktionen, Technologiekategorien und anwendungsspezifische Techniken zur Datenfusion identifiziert. Es bietet eine systematische Sicht auf das Fusionsnetzwerk, welches die Informationen vereinigt. Das JDL-IF-Modell ist eines der am weitesten verbreiteten Modelle und wird gerne für sensorbasierte Prozesse verwendet, da sich hierüber dedizierte Stufen der Sensordatenverarbeitung strukturiert und übersichtlich abbilden lassen.

⁷ JDL "-Modell (Joint Directories of Laboratory), wurde von den gemeinsamen Direktoren der Laboratorien in der U.S. Verteidigungsabteilung entwickelt, White Jr. 1991.

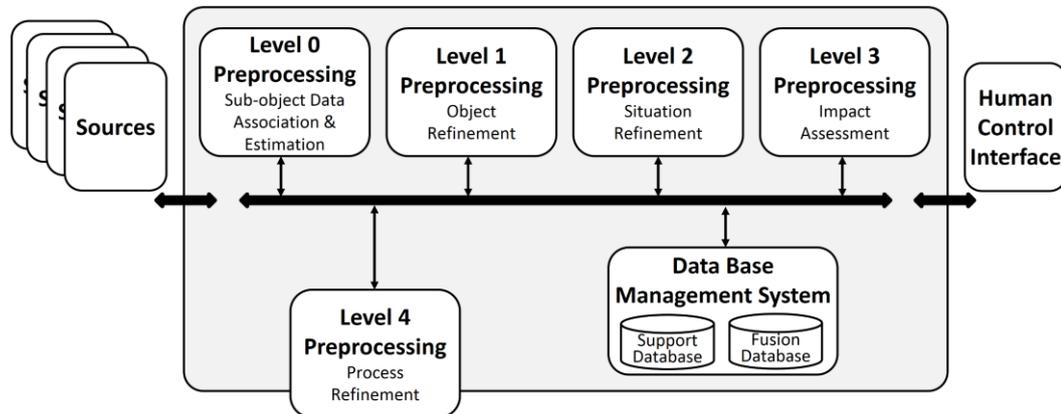


Abbildung 3.1: Das JDL-Datenfusionsmodell nach (Hall, L., David und Llinas 1997)

Dem JDL-Datenfusionsprozessmodell liegt eine zweischichtige Hierarchie zugrunde. Auf der obersten Ebene ist der Datenfusionsprozess konzeptualisiert durch (unterschiedliche) Informationsquellen sowie durch menschliche Interaktion über eine Mensch-Maschine Schnittstelle. Quellen sind in dem Modell verantwortlich für die Bereitstellung der Eingangsinformationen und können Sensoren, a priori Wissen (z. B. Referenzen und geographische Informationen), Datenbanken oder menschlicher Input sein. Die darunterliegende Ebene bildet dabei weitere aufeinanderfolgende Fusionsprozess- Ebenen ab:

Ebene 0 dient der Quellenvorverarbeitung, zur Anpassung und Aufbereitung von Informationen. Ebene 1 steht für eine Objektverfeinerung. Ebene 2 dient der Situationsverfeinerung. In Ebene 1 und 2 werden damit die Informationen fusioniert, z. B. im Situationskontext semantisch aufbereitet.

Ebene 3 bildet eine Gefährdungsverfeinerung, projiziert die aktuelle Situation in die Zukunft um Rückschlüsse auf kritische Situationen zu ziehen.

Ebene 4 ermöglicht eine Prozessverfeinerung und kann als Meta-Prozess betrachtet werden, d. h. dieser betrifft auch die Komponenten aus der oberen Ebene.

Ebene 5 dient der Wahrnehmungsverfeinerung durch eine Mensch-Maschine Schnittstelle (HCI).

Ein Datenbankverwaltungssystem unterstützt die Pflege der Daten und stellt diese im IF-System zur Verfügung, ohne der Notwendigkeit alle Informationsquellen abzufragen (z. B. alle Sensorknoten direkt abzufragen).

Der Kern der beschriebenen adaptiven Architektur von (Garcia et al. 2011; Snidaro et al. 2015) enthält die JDL Fusionsprozess-Ebenen 1-3, gezeigt in Abbildung 3.2. In der Architektur können mehrere Prozesse parallel ablaufen, um kontextsensitives und adaptives Verhalten zu erreichen. Jeder IF-Prozess ist den drei abstrahierten Ebenen des JDL-IF Modell angepasst. Common Referencing (CR), Data Association (DA) und State Estimation (SE). Ein Funktionsbaustein namens Problem Space Characterization Logic ist zuständig für das adaptive Management des Systems, dieser ist der JDL-IF Stufe 4 zugeordnet. Hiermit sollen adaptive Anpassungsprozesse durch die Nutzung von Kontextwissen sowie einer Bibliothek von alternativen Algorithmen, mittels eines intelligenten Algorithmus-managers eingebracht werden (angenommene Modelle, Sensorleistung, Informationskonsistenz, etc.). Durch die Kombination verschiedener Techniken sollen so Einschränkungen einzelner Sensoren an die Beobachtungs-Anforderungen und damit der Beobachtungs-Situation angepasst werden können.

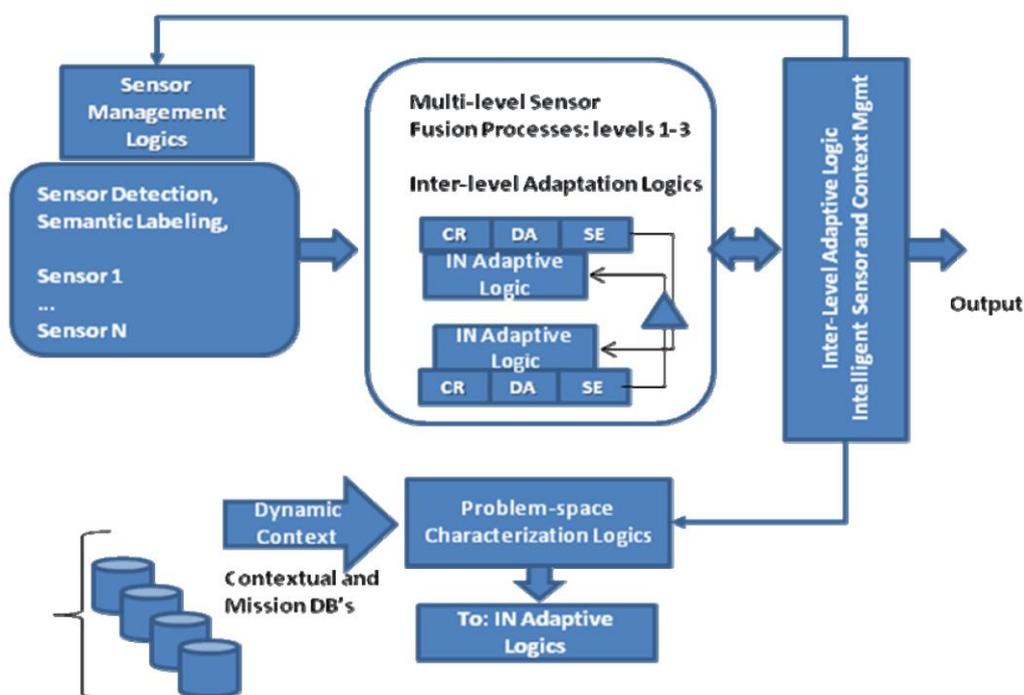


Abbildung 3.2: Übersicht kontextbasierte, adaptive Architektur, Fusionsschritte mit implementierten Level 1-4 JDL Prozessmodellschritten. Quelle: (Garcia et al. 2011)

Die Implementierung einer assoziierten, dezentral angepassten Architektur sowie Tests wurden für maritime Studien mit aufgezeichneten, sowie simulierten Radardaten und AIS-Daten, jedoch nicht mit Live-Videodaten durchgeführt (Garcia et al. 2010). Um Ressourcen in der gesamten Architektur zu verteilen wurden die Fusionsprozesse in zwei getrennte Prozess-Ebenen aufgeteilt, eine lokale- und globale. Die erste (lokale) Ebene ist mit dem lokalen Sensor verbunden und übernimmt lokale Verarbeitungsschritte zu semantischen Daten (beispielsweise eine lokal aufgezeichnete Schiffsroute). Die zweite (globale) Ebene übernimmt die lokalen, semantischen Daten (Teile einer Schiffsroute), verarbeitet diese zu globalen Informationen (komplettierte Schiffsrouten) und übernimmt eine endgültige Ausgabe. Weitere Untersuchungen sind dazu nicht bekannt.

Einen ähnlichen Ansatz verfolgt auch eine vorgeschlagene Architektur (Entwicklungsstatus) mit adaptivem multi-sensor Management für die Kontrolle und Navigation von autonomen Seeschiffen (Prasad et al. 2017). Eine Weiterleitung der optischen multi-Sensorinformation (VIS / IR / NIR, u. a. an Bord positioniert) an andere Beteiligte (Schiffe oder an Land befindliche Nutzer) ist nicht weiter erwähnt.

3.5.2 Multi-Agent Architektur mit OODA-Loop-Modell

Ein allgemeingültiges Beispiel für eine multi-Agent-Architektur (aus dem militärischen Anwendungsbereich) wird in NEOps (Network Enabled Operations) als CanCoastWatch (CCW) präsentiert (Wehn et al. 2007). Hierin wird eine High-Level-Testfeldarchitektur vorgeschlagen um Simulationen von Informationsfusion (IF) auf Basis verteilter Sensorplattformen zum Zweck der Küstenüberwachung durchzuführen. Zu diesem Zweck wird eine OODA-Loop IF-Methode (Boyd 1987) (Beobachten, Orientieren, Entscheiden, Handeln) mit Befehls- und Kontroll-Entscheidungsschleife, für die Unterstützung von Multiagenten (Knoten) angewandt, Knoten können dabei untereinander interagieren, dargestellt in Abbildung 3.3, links.

Die Stufen der OODA-Schleife definieren die wichtigsten Aktivitäten im Zusammenhang mit dem IF-Prozess: Beobachten: Informationsbeschaffung aus den verfügbaren Quellen. Orientieren: Die gesammelten Informationen werden vereinigt, um eine Interpretation der Lage (der Datenströme) zu erhalten. Entscheiden: Ein Aktionsplan als Reaktion auf das Verständnis der Situation wird ausgearbeitet. Handlung. Der Plan wird ausgeführt. Das ODDA-IF-Modell bietet keine ordnungsgemäße Darstellung bestimmter Aufgaben des IF Systems für den Designer.

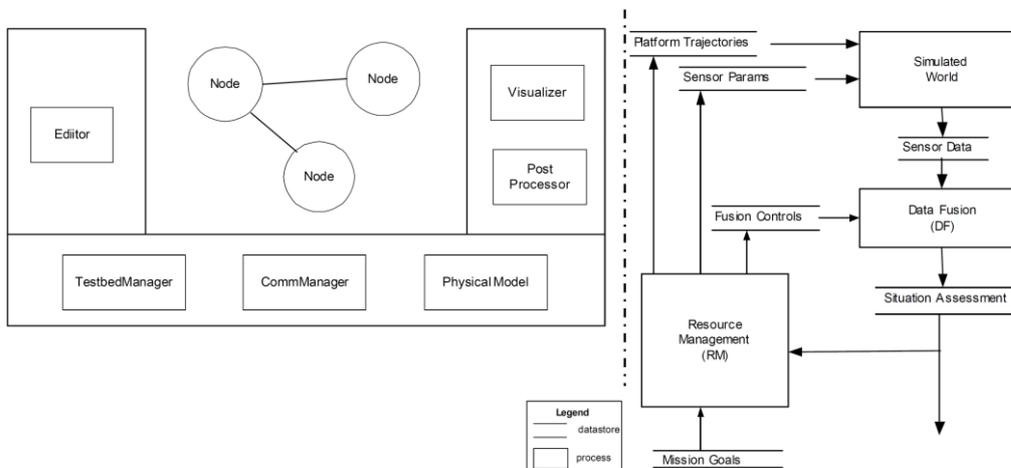


Abbildung 3.3: High-Level Testfeldarchitektur mit multiplen zusammenwirkenden Agent-Knoten (links); IF-Schleife innerhalb eines Knotens nach Observe, Orient, Decide, Act-Prinzip mit Feedback-Schleife (rechts). Quelle: (Wehn et al. 2007)

Simulationsdurchläufe in CanCoastWatch werden mittels eines Editors definiert sowie über einen Testfeldmanager administriert, dargestellt in Abbildung 3.3, rechts. Als Schnittstelle zwischen Editor und OODA-Knoten liegt eine Kommunikationsebene (CommManager) zur Weiterleitung von Eingaben der Startbedingungen, bzw. Eingabe von Anfragen (Queries) an mehrere OODA-Knoten.

Diese geben die bearbeiteten Anfragen (Events) ggf. aus mehreren Schleifendurchläufen, weiter an nachstehende Prozesse (Post-Processor) und schließlich weiter zur Visualisierung für zum Beispiel Kartendarstellungen mit Ereignissen.

CanCoastWatch verwendet zwei architektonische Ansätze, eine komponentenbasierte Standardknotenarchitektur um auf unterschiedliche Architekturebenen zugreifen und diese verändern zu können, beispielsweise um neue Algorithmen über eine Standardschnittstelle einzubringen. Und weiterhin plug and play - Mechanismen über Java JAR-Dateien und XML, um Komponenten während der Simulation leicht zu aktualisieren oder ersetzen zu können.

3.6 Datenstrommanagementsysteme

Es stehen verschiedene Arten von Datenstromverarbeitungs-Plattformen für sensorbasierte Experimente zur Verfügung. Datenstrommanagementsysteme (DSMS) bieten ein abstrakteres Verarbeitungsmodell und erlauben die Formulierung mittels deklarativer Verarbeitungsanforderungen in einer SQL-ähnlichen (Structured Query Language) Weise, z. B. Stream (Arasu et al. 2003), Pipes (Krämer und Seeger 2004). Weiterhin bestehen Datenstrommanagementsysteme, welche eine prozedurale Anfragesprache (PQL) unterstützen, PQL ist eine operatorbasierte Sprache, in der ein Operator als logischer Baustein der Abfrage gesehen werden kann. z. B. Odysseus (Appelrath et al. 2012), Borealis (Abadi et al. 2005), IBM-InfoSphere (Biem et al. 2010). Detaillierte Übersichten und Funktionsweisen dazu sind in Krämer 2007 und Kuka 2015 aufgeführt.

Bei der Verwendung eines hochrangigen deklarativen oder prozeduralen Ansatzes besteht die Möglichkeit Ressourcen wiederzuverwenden, was einen Vorteil für die Reproduzierbarkeit von Experimenten darstellt. Abfragen in DSMS sind kontinuierlich, d. h. diese verarbeiten die eingehenden Daten bis die Abfragen aus dem System entfernt werden. Daten werden dabei nicht mehr nur auf Abruf (pull) zur Verfügung gestellt, sondern aktiv von einer Quelle als Datenstrom gesendet (push). Wenn verschiedene Abfragen auf dieselben Quellen zugreifen, können einige Operatoren potentiell von mehreren Abfragen (Abfragefreigabe) verwendet werden.

Alle diese Systeme werden typischerweise verwendet, um eingehende Daten sofort zu verarbeiten. Keines der oben genannten Systeme bietet von sich aus eine gute Unterstützung für die Wiederholung mit gespeicherten Daten oder die Integration von Szenario-simulationen, obwohl diese Funktionalität jedem System mit einer externen Anwendung hinzugefügt werden kann. Es gibt somit keine einzige DSMS-basierte Plattform die auf alle Anwendungen angewendet werden kann (Yick et al. 2008).

3.7 Zusammenfassung und Handlungsbedarf

3.7.1 Zusammenfassung und Bewertung der verwandten Arbeiten

Die verwandten Arbeiten im Bezug zu vorhandenen Testfeldern und bestehenden Informationstechnologien mit optischen Sensoren im maritimen Bereichen zeigen unterschiedliche Ansätze und Fragestellungen. Überwiegend dienen diese zur Erprobung oder Demonstration im maritimen Verkehrswesen und sind nicht an Umweltfragestellungen orientiert. Teilweise werden optische Daten offline für Umweltfragestellungen hinzugezogen. Im Kontext zur Integration heterogener Sensoren und der Vernetzung wurden Testfelder aus dem Multimedia- und Automobilbereich betrachtet. Hierin werden Aspekte von Sensornetzwerken mit u. a. EO-Sensoren in den Anwendungen für Navigation oder Lagebilderstellung beschrieben, jedoch mit eingebetteten Systemen und eingeschränktem Zugang für weitere Nutzer. Bestehende Testfelder und Systeme für die Umgebungsüberwachung sind nicht für zivile F&E Anwendungen vorgesehen, bieten jedoch teils umfangreiche Funktionen zur Erprobung von EO-Sensoren und der Lagebilderstellung, Umweltaspekte werden hier ebenfalls nachrangig behandelt.

Im Bezug zu bestehenden adaptiven Mechanismen in maritimen (Sensor-) Experimentarchitekturen wurden zwei Beispiele mit JDL sowie ODDA Informationsfusionsmodell vorgestellt. Dabei werden u. a. vernetzte (Sensor-) Knoten für die lokale Vorverarbeitung und darauffolgende Fusion von verteilten Informationen verwendet. Das JDL-IF-Modell bietet aus Sicht des Designers für Sensorexperiment-Plattformen gute Möglichkeiten einzelne Fusionschritte zu identifizieren und zu verfeinern. Die verteilte (lokale/globale) Prozessierung von Garcia et al., kann ebenfalls gut auf Prozessschritte in der Architektur des Testfeldes für EO-Sensoren abgebildet werden, beispielsweise für die lokale Videovorverarbeitung. Eine adaptive Konfiguration der Sensoren ist ebenfalls vorgesehen und bietet Gemeinsamkeiten im vorgestellten Testfeldkonzept. Die verwandte Arbeit von Wehn et al., mit adaptiver OODA-Architektur, scheint für Simulationen geeignet um IF-Mechanismen für Missionsziele zu optimieren, für reale Experimente jedoch mit Mehrfachiteration der Fusionschritte ein Overhead des Systems und dessen Administration darzustellen. Die Arbeit zeigt jedoch auch anwendbare und nützliche Komponenten für das hier zu entwickelnde Testfeld für optische Sensoren. Beispielsweise mit einem Testfeldmanager, der für die leichte

übergeordnete Administration des Systems verwendet wird. Oder auch plug and play-Mechanismen, um Komponenten während des laufenden Betriebs zu aktualisieren oder ersetzen zu können. Aus dem Bereich der Datenstrommanagementsysteme wurden einige Systeme betrachtet. Unterschiede bestehen in deren Handhabung vom Control-Flow, zur Integration neuer Schnittstellen und Ressourcen (Operatorenmodell, Applikationslogik). Im Allgemeinen erfüllen diese DSMS viele der zuvor beschriebenen Anforderungen an das Datenmanagement. Es fehlen jedoch Möglichkeiten für die adaptive Konfiguration der Sensoren zur Laufzeit und der Integration von Simulationsumgebungen sowie Wiedergabemöglichkeiten von Daten.

3.7.2 Handlungsbedarf

Die Übersicht verwandter Arbeiten zeigt unterschiedliche Testfelder, Anwendungen und Informationstechnologien mit optischen Sensoren in unterschiedlichen Bereichen. Es gibt zwar teilweise Ansätze die sich den Fragestellungen in dieser Arbeit widmen, jedoch nicht übergreifend die zuvor identifizierten Funktionalitäten abdecken, z. B. Simulation / Wiederholung gespeicherter Daten. Keine der vorhandenen Testfelder und Plattformen mit optischen Sensoren folgt einem Open-Source-Ansatz und bietet die gemeinsame Nutzung von verteilten Informationen innerhalb eines maritimen Testfeldes an. Besonders der Aspekt neue optische Sensoren für unterschiedliche Szenarien oder Anwendungen im maritimen Umwelt- und Verkehrsbereich zu Testen bleibt meistens unadressiert. Testfelder in realen maritimen Studienumgebungen für optische Sensoren zur Erzeugung von Umweltlagebildern und optischer Strömungsmessung werden demnach nicht umfassend abgedeckt.

Zusammenfassend bestehen damit einige Ansatzpunkte, die mit dieser Arbeit aufgegriffen werden sollen.

- Es bedarf es an einer Lösung für eine flexible Experiment-Plattform zur Verarbeitung und Kommunikation von Livedaten von optischen Sensoren.
- Einem Datenstrommanagement für Sensorverarbeitungsplattformen, welches die gemeinsame Nutzung von verteilten Informationen und die Aktivitäten Ausführung Simulation und Evaluation eng miteinander verknüpft.
- Die Entwicklung und Erprobung von neuen Anwendungen in realen Studiengebieten im Umwelt- und Verkehrsbereich, (z. B. für die Umweltlagebilderstellung oder die optische Strömungsmessung) sowie die Gewinnung von Grundversuchsdaten auf Basis realer Szenarien.

4 Testfeld-Design

Ausgehend von dem aufgezeigten Handlungsbedarf und den zuvor identifizierten Anforderungen wird in den folgenden Abschnitten die physische Testfeldarchitektur, Netzwerkstruktur und Hardwarearchitektur für optische Sensoren mit der Anwendung der maritimen Umweltlagebilderzeugung sowie optischen Strömungsmessung vorgestellt. Dieses Kapitel stellt damit eine Übersicht des gesamten Testfeldsystems und dessen Arbeitsweise zur Verfügung. Die Integration dazu wird in dem darauffolgenden Kapitel anschließend behandelt.

4.1 Testfeldarchitektur

Die Entwicklung der Testfeldarchitektur wurde im wissenschaftlichen Austausch mit anderen Nutzern und Anwendern aus unterschiedlichen Bereichen (Abschnitt 2.3.Nutzerumfrage) durchgeführt und bietet daher eine allgemein übertragbare Architektur auch für andere Studienbereiche. Diese wurde weiterhin in einer gemeinsamen Veröffentlichung vorgestellt (Surm et al. 2016).

Die Systemarchitektur soll geographisch verteilte Installationen und damit einhergehend, auch verteilte Sensorressourcen unterstützen. Abbildung 4.1 zeigt einen Überblick über die wichtigsten Komponenten der entwickelten Testfeldarchitektur. Durchgehende Linien bezeichnen den Datenfluss, gestrichelte Linien den Kontrollfluss. Die Sensor-, Kommunikations-, sowie Anwendungs- Ebenen sind auf der linken Seite in der Abbildung zugeordnet. An dieser Stelle wird noch eine lokale Sensor-Ebene (Verarbeitung) sowie globale Sensor-Ebene eingeführt, welche sich gegenüber dem in Kapitel 2.7 präsentierten Testfeldkonzept unterscheidet. Die lokale Ebene begünstigt unter anderem die Vorverarbeitung von Sensordaten und kann daher komplementär zu „Intelligente Sensoren“ der grundlegenden Architektur von Video-Beobachtungssystemen, welche in Kapitel 2.1.1 vorgestellt wurde, angesehen werden. Ähnliche Ansätze in diesem Zusammenhang wurden auch mit lokalen und globalen Verarbeitungsmechanismen von Garcia et al. präsentiert.

Nachfolgend werden die Architekturebenen, beginnend auf der lokalen Sensor-Ebene über die globale Sensorebene und Kommunikation hin zu der Anwendungsebene beschrieben.

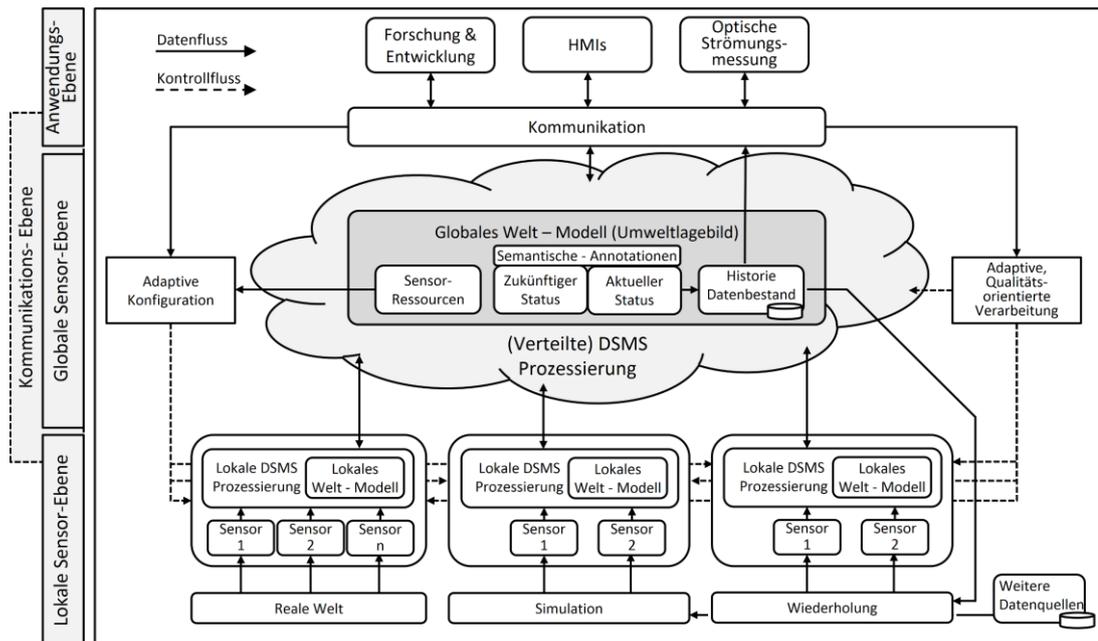


Abbildung 4.1: Physische Architektur des Testfeldes mit verteilten Sensorknoten und Applikationen. Dargestellt sind Kontroll- sowie Datenfluss für die lokale Sensor-Ebene (Reale Welt, Simulation, Wiederholung) und globale Sensor-Ebene mit Umweltlagebild und bilateraler Kommunikation zur lokalen Sensorebene sowie der Anwendungsebene. Nach der gemeinsamen Veröffentlichung von (Surm et al. 2016)

Lokale Sensor-Ebene: Die Integration von mehreren verteilten realen Sensorknoten im Wireless-Sensor-Netzwerk erfolgt auf der untersten Schicht der Architektur, der lokalen Sensor-Ebene. Dabei können mehrere heterogene (optische) Sensoren in einen Sensorknoten eingebunden werden. Viele Sensorquellen liefern dabei sowohl Rohdatenströme als auch statische oder dynamische Metadaten, welche mittels der lokalen DSMS Prozessierung als aggregierte bzw. subsumierte Daten (z. B. Zeitstempel, oder Kamera-Shutter-Status) für weitere Prozessschritte zur Verfügung stehen. Im einfachsten Fall werden sowohl Roh-, als auch Metadaten vom jeweiligen Sensorknoten lokal aufgezeichnet. Oft benötigen Anwendungen keine Rohdatenströme, sondern irgendeine Art von Verarbeitung (z. B. Filter, Videokomprimierung oder ausgewählte Daten). Diese können durch qualitätsorientierte Verarbeitungsmodulen im lokalen Datenstrommanagement mittels adaptiver Konfiguration ausgewählt und als höherwertige semantische Daten für die globale Prozessierung bereitgestellt werden. Welche Konfiguration (unterschiedliche Rohdaten oder höherwertige semantische Daten) jeweils benötigt werden entscheiden

die Anwendungen (der Nutzer) aus der obersten Architekturschicht. Ohne Kommunikation besitzt jeder der Sensorknoten nur sein eigenes (eingeschränktes) lokales Weltmodell der realen Welt. Da in diesem Fall nur lokale, physisch eingebundene Sensordatenströme prozessiert werden. Die Trennung in unabhängige Sensorknoten ermöglicht dabei Ressourcen im Netzwerk zu verteilen. Und auch eine räumliche Verteilung von Sensoren, um großflächige Beobachtungsszenarien zu ermöglichen, bei denen die Abstände zwischen den Sensoren für die drahtgebundene, zentrale Datenaggregation und -Verarbeitung zu groß sind.

In der Architektur sind neben realen Sensorknoten auch noch simulierte Sensorknoten angeordnet. Eine Simulation kann simulierte Sensordaten (-ströme), die in der simulierten Welt erzeugt werden oder aus weiteren Datenquellen eingebunden werden, in die Architektur unter Verwendung eines Simulationssensorknotens eingeben. Zum Beispiel simulierte oder veränderte LIDAR-Scanner- oder Video- Daten, Initiallagesensoren, GPS oder Kartenmodelle. Simulierte Rohsensordaten-Abfragen können über bestehende Anwendungsabfragen formuliert und mittels lokaler Prozessierung verarbeitet werden. Diese stehen dann als simulierte Rohdaten oder höherwertige semantische Daten (als fusioniertes lokales Weltmodell) für die darüber gelegenen Architekturebenen zur Verfügung. Anwendungen und menschliche Akteure können direkt mit der Simulation interagieren und eine vollständige Integration in Simulationsumgebungen schaffen.

Ähnlich wie bei der Integration von Simulationsumgebungen können auch zuvor aufgenommene Szenarien mit Wiederholungs- „Replay“ Sensorknoten in die darüber liegende Architektur eingegeben werden. Ein virtueller Sensoraufbau, der auf einem realen Szenario basiert, ist aus dem Datenbestand aufrufbar, wird neu initiiert und Sensordaten (Rohdaten oder höherwertige semantische Daten) in die Architektur eingegeben. Dabei können komplizierte Szenarien einmal aufgezeichnet und nach Belieben wieder abgespielt werden, um Verarbeitungsabfragen zu verfeinern oder neue Anwendungen zu testen. Auch die Wiederholung aus Replay-Sensorknoten kann gleichzeitig mit der Simulation und realen Sensorknoten (-Daten) verwendet werden.

Globale Sensor-Ebene: Die Ergebnisse aus der lokalen Sensor-Ebene werden nicht nur direkt an Applikationen gesendet, sondern auch in das so genannte Weltmodell integriert. Diese Komponente ist der Schlüssel für ein umfassendes Umweltlagebild. Hier, in der zwischenliegenden Architekturschicht, als globale Sensor-Ebene deklariert. Bevor Sensordaten innerhalb der Architektur weiter genutzt werden, sollten

diese durch Qualitäts- und Validierungskomponenten verarbeitet werden, z. B. prüfen ob ein Shutter-Verschluss in einer Kamera gerade aktiv ist. Für den Endnutzer ist es meistens uninteressant wie die einzelnen Datenströme zusammengeführt werden und einfacher Anfragen an eine übergeordnete Schnittstelle (der globale Sensorebene) zu stellen, als an mehrere verteilte. Der Benutzer sieht das Sensornetzwerk somit als eine Einheit, die über ein High Level Interface abgefragt werden kann. (Live-) Daten aus der unteren lokalen Sensor-Ebene stehen dabei als Sensorressourcen zur Verfügung, z. B. von mehreren verteilten Sensorknoten der realen- oder simulierten- Welt oder von Wiederholungs-Sensorknoten. Auf globaler Sensor-Ebene wird die verteilte qualitätsorientierte DSMS-Prozessierung einzelner Ressourcen nach Anfrage aus der Applikations-Ebene zusammengeführt (fusioniert). Für den Endnutzer bedeutet dies z. B. das er aus allen Sichtbereichen und Empfangsbereichen der verteilten optischen Sensoren ein umfassendes Bild der Lage erhalten kann, nach seinen Präferenzen zusammengestellt. Weiterhin können semantische Annotationen der beobachteten Situation aus dem aktuellen Status / des zukünftigen Status dem Weltmodell hinzugefügt werden. Dieses steht der Applikation und somit dem Anwender bzw. dem Nutzer dann über HMIs zur Verfügung und erleichtert eine kontextbasierte Interpretation der Informationen. Zum Beispiel Lagebild-Kartendaten, Schiffsmodelle oder Chartgraphen aus optischen Sensorinformationen, wie Temperaturverläufe, etc. mit raum-zeitlichen-Bezug. Live-Weltmodelldaten, welche sich somit aus Sensorressourcen und semantischen Annotationen zusammenfügen, können in Archiven gespeichert werden und stehen über den Replay-Sensorknoten zu Wiederholung bereit.

Anwendungs-Ebene: Auf der obersten Ebene dieser Architektur sind die Applikationen angeordnet. Jede Applikation (hier beispielsweise als F&E-Anwendung gekennzeichnet) hat die Möglichkeit Anfragen an Sensorressourcen zu stellen. Um die gewünschten Informationen zu erhalten können diese über eine adaptive Konfigurationskomponente ausgewählt werden. Weiterhin besteht auch die Möglichkeit externe HMI (z. B. über Remoteverbindung) zu nutzen und ein Welt-Modell (Umweltlagebild) an Nutzer bereitzustellen. Dies ist unter Umständen von Vorteil um neue HMI einbinden und testen zu können, z. B. Monitore auf der Schiffsbrücke, Tablets oder Smartphones ohne vorhandenes Datenstrommanagement. Aus der Anwendungsebene kann auch direkt auf den Datenbestand zugegriffen werden. Damit können Roh- und Metadaten direkt von anderen Applikationen

aufgerufen werden. Im einfachsten Fall wäre das ein Aufruf über externe Videoplayer, aber auch andere höherwertige Entwicklungsprogramme welche (qualitätsannotierte) Roh- und Metadaten ohne Live-Datenstrom benötigen. Zum Beispiel für die Entwicklung eines Fernerkundungsmessverfahrens zur optischen Strömungsmessung.

Kommunikations-Ebene: Der Kontrollfluss und Datenfluss zwischen lokaler Sensor-Ebene, globaler Sensor-Ebene und Applikations-Ebene erfolgt über die Kommunikation. Nur mit vorhandener Kommunikation kann ein globales Weltmodell (umfassendes Umweltlagebild) erzeugt und an Nutzer (u. a. an Nutzer zwischen Schiff - Land) bereitgestellt werden. Ohne Kommunikation ist die Testfeldarchitektur an der lokalen Sensorebene abgeschnitten. In diesem Fall sind nur Informationen aus der näheren Umgebung, aus dem Sichtbereich der optischen Sensoren, am Sensorknoten (und für lokale Nutzer) verfügbar. Für einige Fragestellungen bei denen Daten nur gesammelt werden sollen stellt dies kein Problem dar. Beispielsweise im Einsatz in unerschlossenen Studiengebieten (Offshore oder Strand). Hier arbeiten die verteilten Sensorknoten dann autonom und können über lange Zeiträume Rohdaten und Metadaten aus ihrer näheren Umgebung aufzeichnen. Diese können anschließend dem Datenbestand hinzugefügt werden und stehen für F&E Anwendungen zur Verfügung.

4.2 Physische Netzwerkstruktur / Topologie

4.2.1 Physische Netzwerkstruktur

Kohärent zu der physischen Testfeldarchitektur bietet die physische Netzwerkstruktur in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** eine Übersicht von verteilten Sensorsystemknoten, welche beispielsweise im realen Studiengebiet positioniert sind. In der Abbildung sind beispielhaft einem Systemknoten zwei optische Sensoren mit lokalen Sichtbereichen zugeordnet. Mehrere geographisch verteilte Sensorknoten und deren Sensoren decken ein großflächiges Erfassungsgebiet ab, jeweils mit lokalen Sichtbereichen. Die Sichtbereiche können unterschiedlich ausgeführt sein, um z. B. eine Szene im Studiengebiet mit mehreren visuellen Kameras an einem Systemknoten zu erfassen. Allerdings können diese auch stellvertretend für identische Sichtbereiche angenommen werden, jedoch mit unterschiedlichen optischen Sensoren erfasst, um multivariante Daten aus einer Szene bereitzustellen. Beispielsweise über ein breites elektromagnetisches Spektrum im VIS- und IR-Bereich oder durch unterschiedliche Arbeitsweisen, wie beispielsweise abbildende

Kameras in Kombination mit scannenden LIDAR-Sensoren. Die physisch eingebundenen Sensoren stellen Daten für die lokale Prozessierung in einem Sensorknoten zur Verfügung und dieser wiederum ein lokales Weltmodell der lokalen Anwendung bzw. dem lokalen Nutzer.

Alle Sensorknoten und Nutzer werden über die Kommunikation im Testfeldnetzwerk eingebunden. Die Sensorknoten sind dabei stationär oder mobil einsetzbar. Eine Kommunikation erfolgt entweder über kabelgebundenes Ethernet, IEEE 802.3 oder WLAN, IEEE 802.11 (physische Netzwerklayer). Alle Sensorknoten stellen entsprechende Router mit DHCP-Server und damit unabhängig von externen Netzanbietern, Zugang zum lokalen Testfeldnetz bereit. Für stationäre Systeme erfolgen Datenübertragungen über weite Strecken mit Richtfunk WLAN-Brücken, wie in Abbildung 4.3 dargestellt. Weiterhin auch außerhalb der WLAN-Reichweite optional über LTE für mobile Knoten oder durch einen bestehenden lokalen Zugang zu Internet. Eine interne Zeitsynchronisation der verteilten Systeme erfolgt über einen globalen Server nach NTP-Zeitprotokoll. Bei bestehender Kommunikation besteht die Möglichkeit an jedem Sensorknoten das globale kontextbezogene Umweltlagebild

(Weltmodell) mit allen Sichtbereichen (Sensorinformationen) aus dem Studiengebiet zu erstellen.

4.2.2 Netzwerktopologie

Aufgabe der Netzwerktopologie ist die Bereitstellung von geregelten Kommunikationskanälen unter den verteilten Sensorsystemen um eine hohe Verfügbarkeit und geografische Netzwerkabdeckung zu erhalten. Hinsichtlich der Netzwerktopologie für ein abgesichertes und zugleich flexibles Netzwerk, in dem die Sensorknoten integriert werden, sind einige Kriterien zu berücksichtigen. Die Anforderungen ergeben sich unter anderem aus der Betriebsweise bei stationären und mobilen Einsatz. Bei stationär betriebenen Systemen wäre ein starres Routing des Datenflusses noch möglich, für den flexiblen und mobilen Einsatz jedoch nicht.

Für das Testfeld mit mehreren stationären, wie auch mobilen Sensorknoten bietet sich eine vermaschte Netzwerktopologie als Ad-hoc-Netz an, wie auch in anderen Studien verwendet (Lim et al. 2013). Die vermaschte Topologie, wie in Abbildung 4.3 dargestellt, stellt ein dezentrales Netzwerk ohne feste Strukturen zur Verfügung. Es

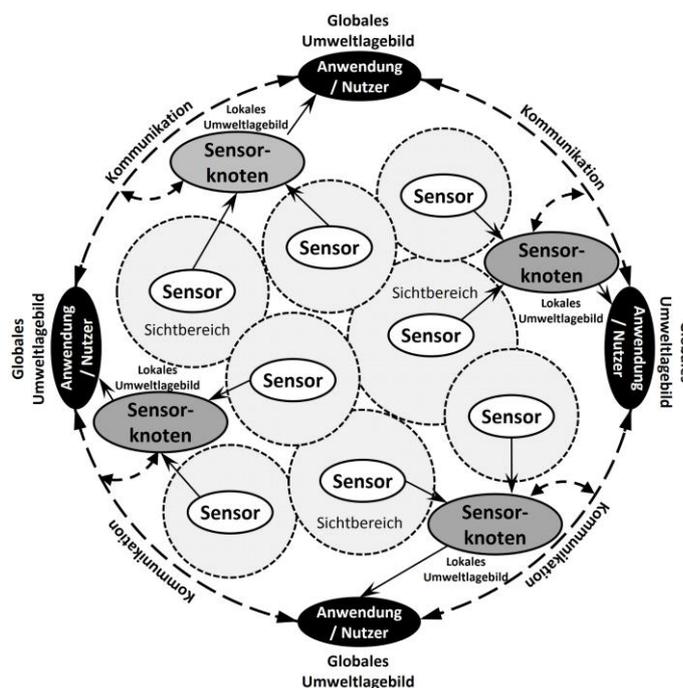


Abbildung 4.2: Physische Netzwerkstruktur mit Sensoren und Sensorknoten mit jeweiligen lokalem Umweltlagebild. Die Kommunikation zwischen den Sensorknoten ermöglicht ein geteiltes globales Lagebild für Anwendungen, bzw. mehrere Nutzer. Nach (Nalbandyan et al. 2014)

bestehen mehrere Übertragungsmöglichkeiten zu verschiedenen Sensorknoten und weiterhin auch ein Zugang für externe Geräte über Remoteverbindung, zum Beispiel Tablets oder andere Geräte mit HMI. Die Maschen-Topologie erhöht die Reichweite insbesondere am Rand liegender Knoten und ermöglicht blockierte oder ausfallende Verbindungen zu umgehen. Bei einem Ausfall einer Verbindung bleibt das Netzwerk betriebsfähig über eine alternative Strecke, um den Datenverkehr unterbrechungsfrei fortzuführen. Weiterhin bietet diese Netzwerktopologie eine Möglichkeit um eine zentrale Administration sowie Steuerung und Wartung zu etablieren.

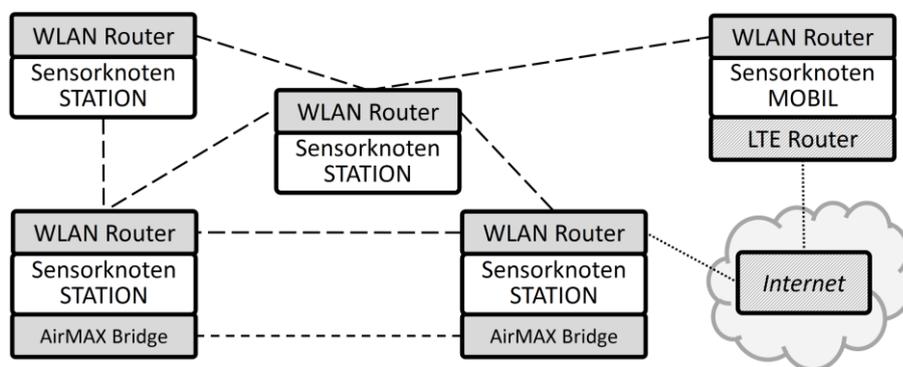


Abbildung 4.3: Vermaschte Netzwerktopologie des Testfelds mit lokalen WLAN und WLAN-Richtfunk (AirMax-Bridge) sowie optionalen Übertragungswegen über LTE

4.3 Hardwarearchitektur

Um eine grundlegende Operabilität und Mobilität des Testfeldsystems für den Feldeinsatz bereitzustellen, werden die Sensorsysteme autark für eine minimale Betriebszeit von 8 Stunden ausgelegt. Alle Sensorsysteme folgen einem modularen, wartungsfreundlichen Aufbau und stellen physische Schnittstellen für Energieversorgung, optische und weitere Sensoren sowie Kommunikationshardware bereit (Ethernet, USB-Schnittstelle, WLAN-Zugang und LAN-Hub), dargestellt in Abbildung 4.4. Die Hardwarearchitektur enthält zentrale Recheneinheiten zur lokalen Datenverarbeitung mit einem Datenstrommanagementsystem. Datenaufzeichnungen können auf lokalen Speicher sowie austauschbaren Speichermedien erfolgen. Eine Referenzierung der jeweiligen Geoposition wird mittels integriertem GPS Sensor erfasst und bereitgestellt. Die Sensorsysteme können problemlos in verschiedenen

Studiengebieten positioniert werden, wo diese ein Multi-Hop-Netzwerk aufbauen. Oder auch dezentral in nicht weiter infrastrukturell erschlossenen Gebieten positioniert werden, ohne Kommunikation nach außen, wo diese Daten aufzeichnen und speichern. Weiterhin bietet die Hardware ein wetterfestes Gehäuse für mobile Outdoor-Messungen.

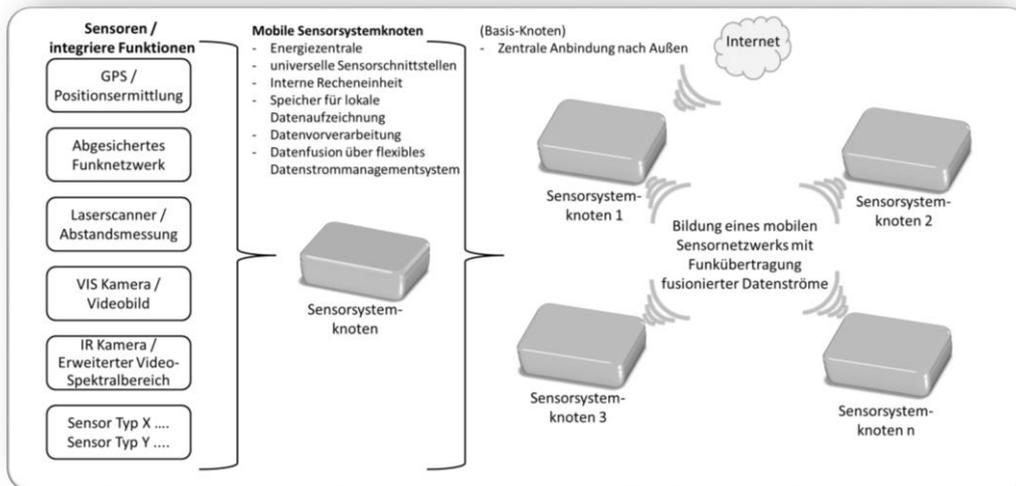


Abbildung 4.4: Übersicht von mobilen Sensorknoten und Sensoren mit Funktionsbeschreibung im Testfeld (links). Rechts Darstellung von mehreren verteilten vernetzten Sensornetzen im Testfeld mit Kommunikation von fusionierten Datenströmen und einem Basisknoten als Zentrale zur Anbindung von Internet bzw. eines Leitrechners.

5 Testfeldsystem - Integration

Diese Kapitel beschreibt die Integration der entwickelten Testfeldarchitektur in explorative Sensorsystemprototypen, diese bilden in den folgenden Anwendungsstudien die Infrastruktur für Testfelder in realen maritimen Studiumgebungen. Die einander aufbauenden Integrationsschritte beginnen mit der Auslegung und Qualitätsprüfung der optischen Sensoren im Kapitel 5.1. Darauf folgend wird die Integration der Hardwarearchitektur sowie der Netzwerkarchitektur in Kapitel 5.2 beschrieben. Im Anschluss widmet sich das Kapitel 5.3 und 5.4 der Integration und Bewertung der Testfeldarchitektur in ein bestehendes Datenstrommanagementsystem. Im Bezug zu den ermittelten Funktionalitäten des Testfeldsystems geben die Kapitel dazu jeweils einen Überblick in einer Zusammenfassung. Kapitel 5.5 stellt eine gesamte Zusammenfassung dar.

5.1 Optische Sensoren

Unterschiedliche optische Sensoren bieten diskrete Informationen aus der beobachteten Umwelt. Entweder direkt ein situatives Bild, wie bei abbildenden VIS- oder IR-Kameras, oder Distanzinformationen durch LIDAR-Laserscanner. Weiterhin steht durch die unterschiedlichen Sensor-Charakteristika ein weites elektromagnetisches Spektrum zur Verfügung, wie in Abbildung 5.1 verdeutlicht. Zusätzlich sind Metainformationen der einzelnen Sensoren vorhanden und können direkt für qualitätssensitive Verarbeitungsschritte und Annotationen der Sensordatenströme genutzt werden.

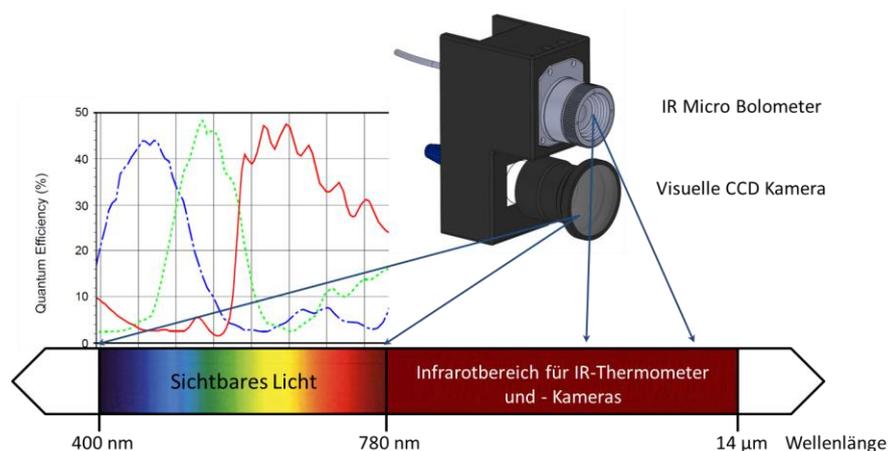


Abbildung 5.1: Spektrale Empfindlichkeitsbereiche elektrooptischer Sensoren; VIS- und IR-Kameras decken in Kombination ein weites elektromagnetisches Spektrum ab

Nachfolgend werden die im Testfeld ausgewählten elektrooptischen Sensoren vorgestellt und die Abbildungsleistung der Kameras in Kombination mit den Optiken ermittelt. Da fast alle Objektive typische radialsymmetrische Verzeichnungen aufweisen soll festgestellt werden in welchem Umfang/Größenordnung diese vorliegen. Um im Vorfeld, vor der ersten Verwendung im Testfeld, nachteilige Abbildungseffekte entweder ausschließen zu können oder durch geeignete Kameramodell-Parameter (Kalibrierfaktoren intrinsische Parameter) beschreiben zu können.

5.1.1 Charakterisierung VIS Optiken und Kamerasystem

Im Bezug zu den Anwendungen der Umweltlagebilderstellung in maritimen Studiengebieten und optischer Strömungsmessung wurden hochauflösende und lichtempfindliche visuelle IP-Farbkameras (GigE Vision Interface) mit 1" CMOS, global shutter Sensor ausgewählt. Diese bieten 2048×2048 Pixel ($5,5 \mu\text{m}$ Pixelgröße), max. 12 bit Auflösung und max. 25 fps (acA2040-gc, Basler, Deutschland).

Im Anwendungsbereich der Umweltlagebilderstellung ermöglichen mehrere versetzt positionierte Kameras die Möglichkeit die Umgebung weiträumig zu erfassen. Hierfür bieten möglichst weitwinklige Objektive, im Bereich um 90° Öffnungswinkel, universelle Einsatzmöglichkeiten. Potentiell geeignete hochauflösende Objektive, für 1" Sensoren, mit 6 mm sowie 8 mm Brennweite (f) wurden in Kombination mit der ausgewählten visuellen Kamera auf deren Abbildungsqualität (intrinsische Kameraparameter) vermessen, um radialsymmetrische Aberrationen, wie sie in Abbildung 5.2 dargestellt sind, zu charakterisieren. Hierfür wurden mindestens 20 multi-konvergente Aufnahmen eines standardisierten Messfelds (Abbildung 5.3, rechts) aus unterschiedlichen Raumwinkeln mit der jeweiligen Kamera-Objektiv-Kombination durchgeführt und mittels Aicon 3D studio (AICON 3D Systems GmbH, Deutschland) die intrinsischen Parameter und radialsymmetrische Aberrationen d_r [μm] berechnet, dargestellt in Abbildung 5.3, links. Im Allgemeinen kann die charakteristische radialsymmetrische Verzeichnung eines Objektivs mit genügender Genauigkeit durch ein Polynom ungerader Potenzen des Bildradius abgebildet werden (Godding 1993). Detailbeschreibungen dazu sind in Anhang C, S: 174 verfügbar.

Details der Kameramodell-Parameter dazu sind im Anhang C.1 Verzeichnung visuelles Objektiv, Typ LM6HC, S: 174 aufgeführt.

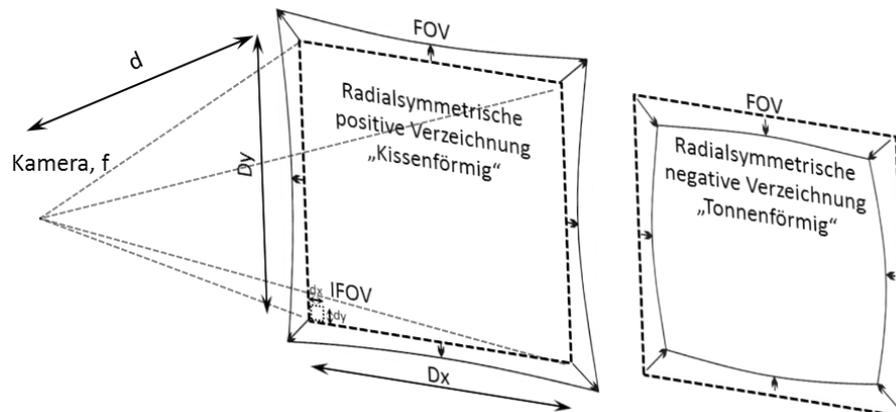


Abbildung 5.2: Auswirkungen von radialsymmetrischer Verzeichnung illustriert an einem Quadrat. Kamera und Objektiv mit entsprechendem Sichtbereich und Brennweite (IFOV, f) sowie Distanz (d) zur projizierten (Objekt-) Ebene. Die Seiten erscheinen gekrümmt, da die Verzeichnung typischerweise mit der dritten Potenz zum Abstand vom Bildmittelpunkt wächst. Links: positive „Kissenförmige“, rechts: negative „Tonnenförmige“ Verzeichnung

Die Ergebnisse der Verzerrungskurven in Abbildung 5.3 zeigen für alle Objektive etwa die gleichen Größenordnungen um 10 - 15 Pixel Abweichung in den Bildmitten und etwa 50 Pixel in den Ecken (bei $5,5 \mu\text{m}$ Sensorpixelgröße). Auffällig ist die hohe Ähnlichkeit zwischen Kowa LM8HC und Spacecom VHF8NK. Eine aussagekräftige Diskriminierung zur Auswahl zwischen den Objektiven durch die vorliegenden Messergebnisse ist bedingt möglich, die Objektive scheinen etwa gleichwertig zu sein. Als Auswahl für die visuellen Kameras der Testfeldausstattung wurde der Typ LM6HC (Kowa Optimed, Deutschland) getroffen. Mit 6 mm Brennweite, 90° Öffnungswinkel bietet dieses Objektiv geringen Randverzeichnungen und gute Kombinationsmöglichkeiten für die verteilte Beobachtung in realen Studienumgebungen.

Sind mehrere Kameras im Rahmen eines Online-Messsystems angeordnet können die Parameter der inneren Orientierung (z. B. durch Umfokussierung), als auch die Parameter der äußeren Orientierung (z. B. durch mechanische Einwirkungen) sich verändern, was zu Maßstabsfehlern bei der Objektbestimmung führen kann (Godding 2002). Eine softwareseitige Korrektur der Verzeichnungsparameter ist möglich, muss jedoch für den Anwendungsbereich und Umgebungsbedingungen entsprechend der Gültigkeit eingegrenzt werden.

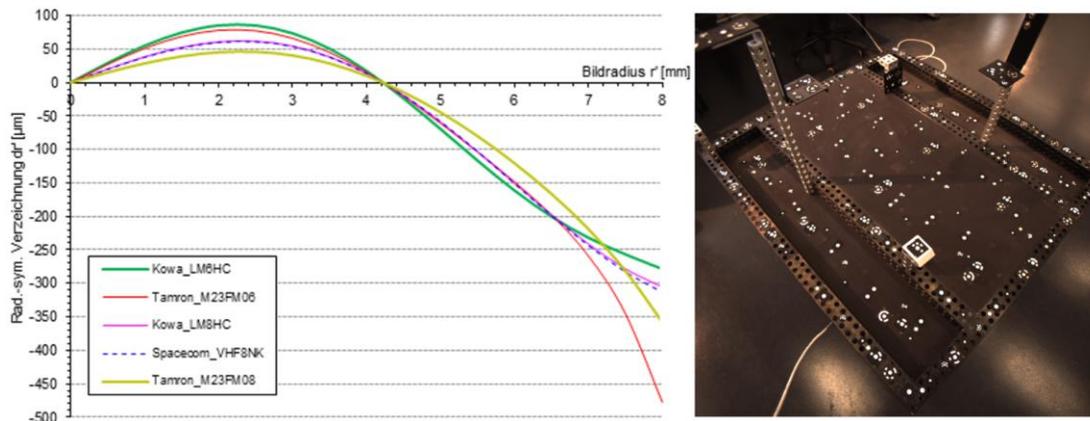


Abbildung 5.3: Verzerrungskurven (radialsymmetrische Aberrationen d_r als Funktion des Bildradius) von unterschiedlichen Objektiven für den visuellen Spektralbereich zeigen Verzerrungen von 10 Pixel in den Bildmitten und über 50 Pixel in den Ecken (links). Verwendetes standardisiertes Messfeld für die Aufnahme von Referenzbildern zur Ermittlung der Kameraparameter (rechts)

Zur Merkmalsextraktion in Computer-Vision Auswertungen kann im Allgemeinen davon ausgegangen werden das eine Maskengröße (Bildinformation) mit 3×3 Pixel ($1 \text{ Pixel} = \text{IFOV}_{dx,dy}$) vorliegen sollten (Jähne 2012). Am Beispiel unter Annahme einer Objektdimension $G_{x,y}$ von 1 m entspricht dies bei perspektivischer Projektion und offener Kamerablende einer maximalen Objektentfernung $d = 363 \text{ m}$, für die ausgewählte visuelle Kamera ($5,5 \mu\text{m}/\text{Pixel}$) - Objektivkombination ($f = 6 \text{ mm}$). Eine detaillierte Berechnung zum IFOV sowie der Detektionsentfernung ist in Anhang D: Visuelle Kamera-Objektbetrachtung, S: 176 aufgeführt, nach:

$$d = \frac{f G_{x,y}}{3 \text{ IFOV}_{dx,dy}} \quad (5.1)$$

5.1.2 Charakterisierung IR Optiken und Kamerasystem

Eine radiometrisch (NUC) und optisch (d_r) kalibrierte IR-Kamera des Typs PI450 (Optris GmbH, Deutschland) bietet ergänzend zu den visuellen Kameras in dem Testfeld Videodaten im infraroten elektromagnetischen Spektralbereich. Das Mikrobolometer basiert auf einem ungekühlten FPA ($25 \mu\text{m} \times 25 \mu\text{m}$) mit 382×288 Pixel optischer Auflösung. Die Kamera verfügt über eine interne Gehäuse- und FPA-Beheizung zur Temperaturstabilisierung. Diese bietet 80 fps oder 27 fps, einem

sensitiven Spektralbereich von 7,5 - 13 μm mit maximal 0,04 K thermischer Empfindlichkeit (Objektivabhängig). In einem Temperaturbereich von -20 °C bis 100 °C (Systemgenauigkeit ± 2 °C oder ± 2 %) stellt die Kamera radiometrische Messwerte 16 bit farbcodiert als Videobild bzw. als Temperaturmatrix zur Verfügung. Die Auswahl berücksichtigte u. a. verfügbare Schnittstellen (USB/GigE Vision über Ethernet), Dokumentation, SDK (Software Development Kit), Hardwaretreiber, verfügbare Wechselobjektive sowie das Preis-Leistungs-Verhältnis.

Die geometrische Charakterisierung der Infrarotkamera und der verwendeten IR-Optiken bildet, analog wie auch bei der visuellen Kamera-Objektiv-Kombination, eine Grundlage für den zielgerichteten Einsatz in verschiedenen Anwendungen des Testfeldes. Die intrinsischen Parameter als auch die radialsymmetrische Verzeichnung wurden, wie in Kapitel 5.1.1 beschrieben, vermessen. Da ein herkömmliches Messfeld für visuelle Kameras, wie in Abbildung 5.3 (rechts) dargestellt, keine auswertbaren IR-Signaturen bereitstellt, wurde ein Messfeld nach Luhmann et al. verwendet. Die IR Signaturen des Messfelds werden dabei durch Reflexion natürlicher IR-Emission aus der Umgebung bereitgestellt. Den systematischen Aufbau zeigt die Abbildung 5.4, rechts. Die Ergebnisse der radialsymmetrischen Verzeichnungen für unterschiedliche Objektive (Weitwinkel $f = 10,5 \text{ mm} - 62^\circ$, Standard $f = 18,7 \text{ mm} - 29^\circ$, Tele $f = 41 \text{ mm} - 13^\circ$) sind in Abbildung 5.4, links dargestellt.

Detailergebnisse der Kameramodell-Parameter sind dazu in Anhang C.2 Verzeichnung IR Objektiv, S: 175 aufgeführt.

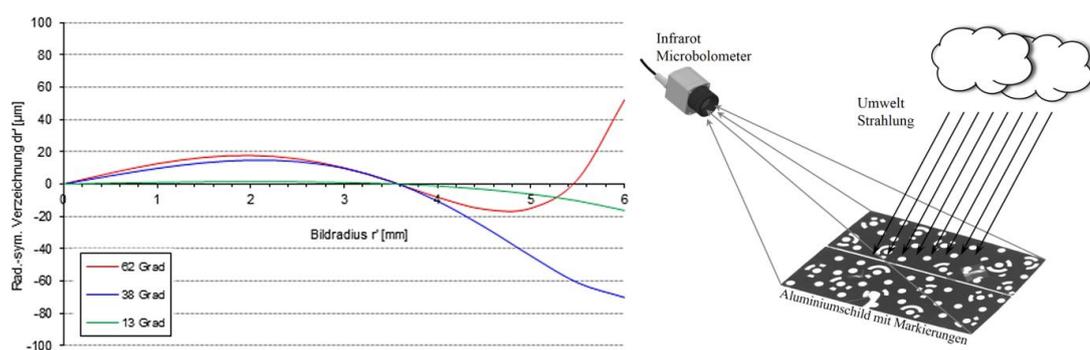


Abbildung 5.4: Radialsymmetrische Verzeichnung dr für unterschiedliche Objektive für den IR-Spektralbereich zeigen geringe Verzeichnungen unter 1 Pixel (links). Zugehöriges Messfeld für die Ermittlung von Kameraparametern für den IR-Spektralbereich (rechts). Nach (Luhmann et al. 2013)

Alle Objektive zeigen sehr geringe Aberrationen d_r , größtenteils unter $20\ \mu\text{m}$ (Detektorpixelgröße $25\ \mu\text{m}$), also unter 1 Pixel. Die geringen Verzeichnungen werden durch softwareseitige Korrekturberechnung erreicht, diese scheint recht gut und aktuell zu sein. Das Teleobjektiv (13°) hat besonders kleine Abweichungen, wie prinzipiell zu erwarten ist. Die beiden anderen Objektive sind fast gleichwertig in der Bildmitte mit unterschiedlicher Tendenz ganz am Rand bzw. in den Bildecken, wo $+2$ (62°) bzw. -3 (38°) Pixel erreicht werden. Detaillierte radiometrische Kalibrierungen sind ergänzend im Anhang E: Auflösung, Stabilität, NUC, IR-Kamera S: 177 aufgeführt. Die Ergebnisse der Temperrauflösung und NUC sind gut für die Applikation in Verkehrsstudien geeignet und gerade noch ausreichend (wie zu erwarten ist für ein ungekühltes Kameramodell) für die nachfolgenden Testfeldapplikationen im Bereich der maritimen Umweltbeobachtung.

Analog zu den visuellen Kameras kann mit 3×3 Pixel (IFOV_{d_x, d_y}) die maximale Objektentfernung (d) für eine Objektdimension $G_{x, y}$ von 1 m bei perspektivischer Projektion ausgelegt werden. Eine detaillierte Berechnung zum IFOV sowie der Detektionsentfernung ist in Anhang F: IR Kamera-Objektbetrachtung, S: 179 aufgeführt. Für das Mikrobolometer FPA und den unterschiedlichen verfügbaren Objektiven ergibt sich (d) am Beispiel mit $G_{x, y}$ von 1 m mit: $f = 10,5\ \text{mm} - 140\ \text{m}$; $f = 18,7\ \text{mm} - 250\ \text{m}$; $f = 41\ \text{mm} - 546\ \text{m}$.

5.1.3 LIDAR Laserscanner

Industrielle LIDAR Laserscanner des Typs LMS111 sowie LMS151 (SICK AG, Deutschland) bieten im Testfeldsystem zweidimensionale Abstandinformationen in Form von Polarkoordinaten. Diese decken einen Reichweitenradius bis $20\ \text{m} / 50\ \text{m}$ mit einem horizontalen FOV von 270° ab und arbeiten mit internen Korrekturverfahren für viele der zuvor in Kapitel 2.5.3 beschriebenen Umgebungsinterferenzen. Diese Sensoren verfügen über Laserdioden bei typischer $905\ \text{nm}$ Wellenlänge und einer Scanfrequenz bis zu $50\ \text{Hz}$. Die Datenkommunikation erfolgt über TCP/IP Interface. Die minimale Erfassungsdistanz liegt bei $0,5\ \text{m}$ und über den Messbereich mit einer Genauigkeit vom im Mittel $\pm 30\ \text{mm}$ vor. Mit einer Winkelschrittweite (Auflösung) von $0,5^\circ$ stehen in der maximalen Detektionsdistanz von $20\ \text{m} / 50\ \text{m}$, Objektinformationen mit einem minimalen horizontalen Ausmaß von $147\ \text{mm} / 436\ \text{mm}$ zur Verfügung. Im Testfeld werden üblicherweise bewegende Objekte (z. B. Schiffe), oder statische Umgebungen (Hafenanlagen bspw.) mit

mobilen Scannern mit 50 Hz Scanfrequenz erfasst. Somit stellen die minimalen horizontalen Objektausmaße keine Limitierung für die Testfeldapplikationen dar.

5.1.4 Zusammenfassung optische Sensoren

Die Integration mehrerer geographisch verteilter optischer Sensoren, welche in Tabelle 5.1 zusammengefasst sind, soll Informationen aus großflächigen Gebieten bereitstellen. Durch die Verwendung unterschiedlicher elektromagnetischer Empfindlichkeiten, wie in Abbildung 5.1 dargestellt, sowie durch verschiedene Arbeitsweisen der elektrooptischen Sensoren (Scannend / Abbildend) stehen im Testfeld umfangreiche Möglichkeiten für die Forschung und Entwicklung zur Verfügung. Die optischen Sensoren wurden nach technischen- und Anwendungskriterien sorgsam ausgewählt und deren Abbildungsqualität nach Stand der Technik vermessen oder berechnet. Im Bezug zu dem aufgestellten Anforderungskatalog sind damit grundlegend, Messbereich / Auflösung, räumliche Abdeckung, geographische Verteilung und Framerate / Verfügbarkeit, berücksichtigt. Insgesamt bietet das Testfeld vier hochauflösende schnelle visuelle Kameras mit 90° Objektiven sowie 180° Fisheye-Objektive (nicht weiter aufgeführt). Eine qualitativ hochauflösende IR-Kamera mit 3 Wechselobjektiven. Weiterhin drei LIDAR-Scanner und GPS-Sensoren. Alle Sensoren sind gut für den mobilen Einsatz geeignet und bieten durch deren standardisierte Schnittstellen für Energie und Kommunikation (Ethernet) die Möglichkeit einer flexiblen Positionierung in realen maritimen Studiengebieten. Nachfolgend stellt die Übersicht die wichtigsten Sensormerkmale zusammen.

Tabelle 5.1: Zusammenfassung verwendete „Basissensoren“ in Testfeld

Sensor	Typ	Dateninterface Daten	Auflösung	Bildwiederhol-/ Frequenz (max)	Spektral- bereich	Weitere Eigenschaften
Visuelle Kamera	Basler acA2040-gc	GigE Vision C++, SDK RGB Video	2048 x 2048 pix	25 fps	450 -700 nm	
IR Kamera	Optris PI 450	SDK / (IPC, über .dll Bibliothek) Temperatur Video	382 x 288 pix Temperaturbereich 20°C – 100°C Auflösung 0,04 K	27 fps	7,5µm -13 µm	Systemgenauigkeit ± 2°C / ± 2% Objektivverzeichnung kompensiert
Lidar scanner	SICK LMS 110 LMS 151	TCP / IP Abstand / Entfernung Polarkoordinatenkarte	270° Erfassungswinkel 0,5° Winkelauflösung	50 Hz	905 nm	1 -20 m / 50m Arbeitsbereich (80% Remission)
GPS	Navilock NL-602U	USB / RS232 NMEA 0183 NMEA 2002	max. 2,5 m CEP Streukreisradius horizontal (statisch)	5 Hz		GPS / zukünftig GALILEO

5.2 Hardware

Für die Hardware der explorativen Prototypen wurden Module zusammengestellt und eingesetzt um eine grundlegend erforderliche langfristige Verfügbarkeit und Interoperabilität zu gewährleisten. Insgesamt standen somit vier Sensorsysteme, wie in Abbildung 5.5 dargestellt, zur Verfügung, deren Komponenten-Integration und Systemdetails in den nachfolgenden Abschnitten beschrieben werden.



Abbildung 5.5: Mobile autarke Sensorsysteme, ausgestattet mit visueller Kamera (rechts) sowie LIDAR Scanner (links) in einem Hafengebiet, bieten Energieversorgung, Schnittstellen und Kommunikation für dezentrale Beobachtungen maritimer Studiengebiete

5.2.1 Energieversorgung

Das gesamte Sensorsystem baut auf einer Grundspannungsversorgung von 12 V DC auf, wie im Blockschaltbild in Abbildung 5.6 dargestellt. Damit wird einerseits Schutzkleinspannungen verwendet und unterstützt den sicheren Umgang im Feld. Weiterhin besteht somit die Möglichkeit Akkumulatoren für den autarken Betrieb einzusetzen. Hierfür wurden Akkumulatoren mit einer Nennladung von 100 Ah verwendet, die über ein integriertes 230 V Erhaltungsladegerät gespeist werden können. Die Energieversorgung ist unterbrechungsfrei ausgeführt und bietet die Möglichkeit im laufenden Betrieb, sowohl den Akkumulator zu wechseln, bzw. die externe Speisung zu entfernen. Die ausgelegte Betriebszeit beträgt mindestens 8 Stunden mit voller Sensorbestückung und voller Vernetzung in Feld. Das Sensorsystem bietet abgesicherte 12 / 24 V DC Schienen für eine flexible Versorgung unterschiedlicher Sensoren und Kameras.

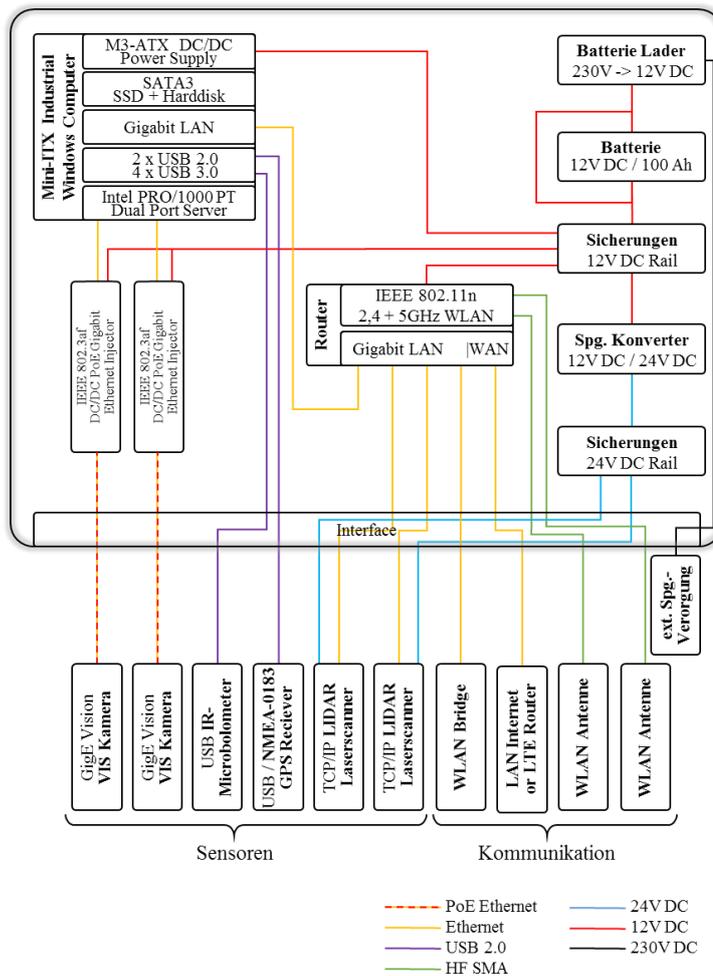


Abbildung 5.6: Blockschaltbild eines Sensorsystemknotens im Testfeld.

Oben: Recheneinheit mit Speicher (CPU) und Schnittstellen, Kommunikationshardware sowie Energieversorgung für den autarken Betrieb. Unten: Interface für unterschiedliche Sensoren, Kommunikation und ext. Energieversorgung

5.2.2 Schnittstellen

Ethernet- sowie USB- Schnittstellen werden für Sensoren über einen integrierten Rechner sowie Router bereitgestellt und teilweise über ein wetterfestes Interface nach außen geführt. Für Kameras sind Schnittstellen nach GigE Vision Standard IEEE 802.3af verfügbar. Eine Erweiterung der USB-Schnittstellen über USB-Server mittels TCP/IP Socket bietet die Möglichkeit weitere Übertragungslängen für USB Geräte zu realisieren. Der integrierte Mini-ITX Rechner beinhaltet eine Intel Core i7 CPU mit $4 \times 3,20$ GHz, einen SSD-Speicher sowie 16 GB DDR3-1600 DIMM Arbeitsspeicher. Als Speicher stehen 1 TB intern für Daten zur Verfügung, sowie weiterhin 2 TB mittels USB-Wechselspeicher. Für die hochauflösenden visuellen Kameras sind Zusätzlich Gigabit Ethernet Schnittstellen mit Intel-Chipsätze nach Performance-Treiber Herstellvorgaben (Basler AG 2012) verfügbar. Das Sensorsystem bietet außerdem optional HMI-Schnittstellen für Monitor und Tastatur, etc.

5.2.3 Kommunikation

Die Integration der Kommunikation berücksichtigt nicht nur Hardwarekomponenten, sondern auch die Herstellung der Kompatibilität zur (autarken) Vernetzung mehrerer Sensorsystemknoten durch entsprechend standardisierte Protokolle und Routing für ein Ad-Hoc-Netzwerk in den Studiengengebieten, welche im folgenden Abschnitt 5.2.4 erörtert werden. Die Kommunikation stellt unter anderem auch eine Kernkomponente des Systems dar um den Zugriff auf verteilte Informationen für Anwendungen und Nutzern des Testfeldes zu ermöglichen. In diesem Unterkapitel werden nun nachfolgend die physischen Kommunikationskomponenten erörtert.

Für die drahtlose autarke Kommunikation stehen interne WLAN-Router (TP-Link) zur Verfügung. Diese unterstützen MIMO-Technik (Multiple Input Multiple Output) über mehrere Frequenzkanäle mit 2,5 GHz sowie 5 GHz im IEEE-802.11n WLAN-Standard. Im 5 GHz Bereich sind Datenübertragungsraten bis 450 Mbit/s möglich bei einer Sendeleistung von 1000 mW. Ohne Störeinflüsse beträgt die Reichweite im Außenbereich 250 m und wird über externe Antennen mit HF-SMA-Verlängerung realisiert. Für eine erfolgreiche mobile Vernetzung sollten u.U. Störungen durch (Schiffs) Radar berücksichtigt werden. Weiterhin ist auf Konformität der verwendeten Geräte bezüglich automatischer Umschaltung der Datenübertragungsfrequenzen zu achten, da im identischen 5 GHz Bereich beispielsweise auch Wetterradar oder Flugnavigationen (mit Vorrang) übertragen werden (Bundesnetzagentur 2016). Weiterhin besteht die Möglichkeit der drahtgebundenen Anbindung nach IEEE 802.3 (Karl und Willig 2005).

Als Erweiterung für größere Distanzen im stationären Betrieb > 250 m stehen WLAN Richtfunkantennen mit 5 GHz WLAN und airMAXac Protokoll mit Datenübertragungsraten bis 450 Mbit/s zur Verfügung (NanoBeam M5 AC 500, Ubiquiti, USA) (Ubiquiti Networks). Für die Erprobung einzelner Komponenten wie z. B. die Video-Streaming-Eignung, Datendurchsatz und geographische Abdeckung von Kommunikationsantennen wurden Labor- sowie Feldtests durchgeführt. Die drahtlose Hochvolumen-Datenübertragung für, zum Beispiel Onshore- / Offshore-Kommunikation, wurde im Feld über eine Reichweite von 600 m mittels 5 GHz WLAN-Richtfunk mit bis zu 360 Mbit/s mittels LAN Speed Test v1.3.1 (TotuSoft .Inc) und temporär ausgerichteten Antennen getestet, dargestellt in Abbildung 5.7. Nach Antennenspezifikationen sind weitere Strecken bis zu 5000 m unter Einschränkung des Empfangswinkels realisierbar.

NanoBeam M5 AC 500 Feldtest @ 600m / avg. 367 Mbps

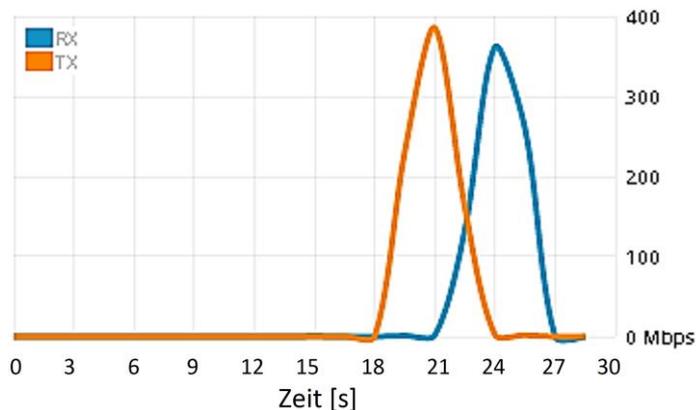


Abbildung 5.7: Datendurchsatz im Feldbetrieb für WLAN-Richtfunk über eine Entfernung von 600 m, mittels LAN Speed Testprogramm. Der Datendurchsatz für Rx (Receiver exchange) sowie Tx (Transmitter exchange) beträgt etwa 360 Mbit/s mit temporär installierten Antennen

Alle diese Kommunikationstechnologien stellen im Studiengebiet ein eigenständiges und damit unabhängig von der Infrastruktur bestehendes Netz für stationäre und mobile Testfelder zur Verfügung.

Im Rahmen der Forschung mit optischen Sensoren im Bereiche von e-Navigation werden hochvolumige Datenströme von mobilen Sensorsystemknoten aus, für ein bestimmtes Experiment übertragen, z. B. von bewegten Plattformen oder Schiffen. Innerhalb des WLAN-Abdeckungsgebietes eines Testfeldes von ca. 62.000 m² (bezogen auf vier Sensorknoten) stellt dies kein Problem dar, jedoch sollen auch Teilnehmer aus weiteren Entfernungen eingebunden werden können. Eine feste Richtfunkverbindung (auch wenn entsprechende Rundstrahl-Antennen-Abstrahl-Charakteristiken verfügbar sind) ist für den mobilen Einsatz ungeeignet. Als Option für mobile Systeme steht daher auch der Kommunikationsweg über LTE zur Verfügung. Diese Technologie bietet Übertragungsgeschwindigkeiten von bis zu 300 Mbit/s im Downstream (Rx) und bis zu 72 Mbit/s im Upstream (Tx) (LTE-Router, B593s-12, Huawei Technologies, China) (HUAWEI 2013).

5.2.4 Netzwerk

Die Vernetzung von Sensorknoten soll für den Nutzer in realen Studiengebieten möglichst komfortabel und ohne weitere Konfiguration geschehen, so einfach wie das Anschließen eines Ethernetkabels an einen PC oder der Zugang mit den heutzutage vielfach verwendeten mobilen Endgeräten über WLAN zum Internet. Im Folgenden wird dazu die Implementierung der Netzwerktopologie und das Netzwerkmanagement beschrieben. Weiterhin wird auf die essenziell notwendige Funktion der Zeitsynchronisation zwischen verteilten Netzwerk-Systemknoten eingegangen.

5.2.4.1 Netzwerk -Topologie und -Management

Geografisch verteilte mobile und stationäre Sensorknoten können über Ethernetkabel, WLAN, Richtantennen oder LTE verbunden werden und bilden, ein mit WPA2-Sicherheitsstandard abgesichertes und Authentifiziertes, vermaschtes Ad-Hoc-Netzwerk (Lim et al. 2013) mit einem einzigen Subnetz, dargestellt in Abbildung 4.3. Hierfür wurde eine socket-basierte Kommunikation über TCP/IP verwendet. Üblicherweise werden die Systemknoten als "Clients" und ein weiterer Systemknoten als "Server" (Basisstation) im Feldaufbau eingesetzt. Da jeder Systemknoten einen eigenen WLAN-Router enthält, der einen DHCP-Server für drahtlose Geräte anbietet, werden jeweils unterschiedliche DHCP-Adressbereiche verwendet. Damit werden Kollisionen zwischen mehreren DHCP-Servern in einem einzelnen Subnetz vermieden. Um die statische und dynamische Adresszuweisung sowie -Erkennung zu vereinfachen, kann ein Block von 255 IPv4-Adressen zu jedem Sensorsystem zugeordnet werden, beginnend mit 190.168.1.x / 16 für den ersten Knoten, 190.168.2.x / 16 für den zweiten Knoten, usw. Mit einer 16-bit-Subnetzmaske sind dabei alle Adressen im Block 190.168.x.y zu demselben Subnetz zugeordnet, was die Netzwerktopologie und das Setup drastisch vereinfacht. Jeder DHCP-Server ordnet somit Adressen im Bereich 190.168.x.100 ... 190.168.x.254 zu. Die Administration der Subnetze kann hierbei über eine Managementsoftware (Air OS v.7.1⁸, Ubiquiti, USA) administratorfreundlich zur erstmaligen Einrichtung erfolgen.

Da Sensordatenströme / das lokale Weltmodell von den Clients über größere Entfernungen im Allgemeinen über das Internet mittels LTE bereitgestellt werden sollen, wird eine Schnittstelle zwischen physisch getrennten Standorten benötigt um

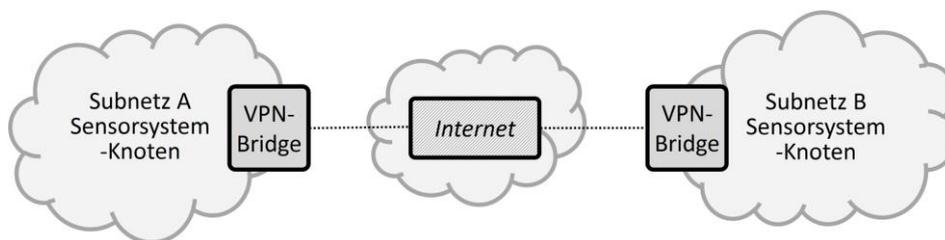


Abbildung 5.8: Vernetzung von geographisch- und physisch- getrennten Subnetzen mit mehreren Sensorsystemknoten mittels VPN-Bridge über Internet

⁸ <https://www.ubnt.com/airmax/airos7/>

deren Ethernet-Netzwerke logisch zusammenzuführen. Um dies zu realisieren besteht die Möglichkeit unterschiedliche Subnetze mittels VPN (Virtual Private Network) zu verbinden, gezeigt in Abbildung 5.8. Hierfür wurde die Open-Source-Software SoftEther VPN Projekt (Universität Tsukuba, Japan (SoftEther VPN Project)) in die Sensorknoten integriert. Neben den grundlegenden VPN-Server- und Client-Funktionen bietet die Software auch eine VPN-Bridge, welche zwei räumlich getrennte Teile des gleichen Subnetzes über das Internet mittels einer emulierten Hardware-Netzwerkbrücke verbindet. Dies ermöglicht es mit Clients in einem Teil des Netzwerks direkt auf Sensoren in einem anderen Teil des Netzwerks über Ethernet zuzugreifen, ohne zusätzliche spezifische Sensordatenzugriffssoftware auf allen weiteren, im Subnetz bestehenden, Sensorsystemknoten. Durch die präsentierte Topologie und Konfiguration wird eine automatisierte Vernetzung in Studiengebieten ermöglicht. Das Testfeldnetzwerk bietet dadurch eine hohe Ausfallsicherheit und komfortablen abgesicherten Zugang für unterschiedliche Sensorsystem-Clients sowie deren Nutzer.

5.2.4.2 Netzwerk - Zeitsynchronisation

Alle Sensorsysteme im Wireless Sensor Netzwerk benötigen ein gemeinsames Timing um eine gemeinsame Zeit-Daten-Basis zu schaffen und die verteilt vorliegenden Datenströme mit absoluten Zeitstempeln zu verarbeiten. Ziel ist es die lokale Uhr des jeweiligen Knotens im Netzwerk zu synchronisieren. Hierzu bestehen unterschiedliche Ansätze und Zeitsynchronisationsprotokolle. Diese unterscheiden sich durch die Anwendbarkeit auf Netzwerkebenen (MAC-Layer-basierte vs. standardbasierte Ansatz) als auch von der Art der bestehenden Netzwerkart (mobil / stationär) und Topologie (Single-Hop vs. Multi-Hop). Eine gute und umfangreiche Übersicht dazu ist in (Yick et al. 2008) aufgeführt, auf die an dieser Stelle für weitere Detailbetrachtungen und Ausführungen verwiesen wird. Für die mobilen / stationären, lokalen sowie verteilten TCP/IP basierten Netzwerke des Testfeldes eignet sich eine standardbasierte interne Zeitsynchronisation jedes Systemknotens auf Basis eines globalen UTC Standard (universell koordinierte Zeit) um Offsets der lokalen Uhr zu minimieren. Hiermit werden Genauigkeiten von etwa 10 Millisekunden (netzwerkübergreifend) gehalten. Diese Synchronisation nutzt das NTP-Protokoll (Network Time Protocol) in der TCP/IP-Anwendungsebene und verwendet das verbindungslose UDP-Transportprotokoll. Alle Sensorsystemknoten nutzen hierfür die Synchronisierung auf Basis des NTP-Zeitservers npt.uni-oldenburg.de.

5.2.5 Zusammenfassung Hardwareintegration

Mit der detaillierten Funktionszuweisung im Vorfeld konnten modulare aufgebaute Sensorsysteme nach Stand der Technik ausgerüstet werden und stehen als wetterfeste Sensorsystemknoten für stationäre sowie mobile (maritime) Studiengebiete zur Verfügung. Diese decken die Funktionen Schnittstellen-, Kommunikation- und Energieversorgung- bereitstellen ab. Zusätzlich konnten die sicher zu betreibenden Systeme als kompakte tragbare Hardware umgesetzt werden, womit auch schwer zu erreichende Studiengebiete oder Schiffe einfach als Testfeld ausgestattet werden können. In dieser Ausbaustufe wurde die Idee vom energy-harvesting, der Speisung über regenerative Energiegewinnung wie z. B. mittels Solar Photovoltaikanlage, nicht realisiert. Dieses Modul kann jedoch bei Bedarf nachgerüstet werden. Die Kommunikationstechnik wurde kabellos auf hohe Datentransferraten ausgelegt, wobei darauf geachtet wurde, etablierte und standardisierte Techniken mit weiträumiger Verfügbarkeit wie WLAN und LTE in das Testfeldsystem zu integrieren. Im Anschluss wurde ein besonderes Augenmerk auf die Implementierung der Ad-Hoc-Netzwerk Konfiguration, deren Erweiterbarkeit und Administration gerichtet damit unterschiedliche Zugangsarten zu den Testfeld-Sensorsystemknoten bei stationären sowie mobilen Anwendungen zur Verfügung stehen. Hierfür wurde der Ansatz einer einheitlichen Subnetzmaske umgesetzt, die durch eine VPN-Bridge auch außerhalb der physischen Erreichbarkeit Verbindungen zu dem Testfeldnetzwerk gewährleistet. Zum Schluss wurde noch das Thema Testfeldsystem-Zeitsynchronisation erörtert und deren Notwendigkeit dargestellt um eine gemeinsame Zeit-Daten-Basis der verteilten Datenströme zu etablieren und der gewünschten Funktion synchronisierter Betrieb nachzukommen. Hierfür wurden unterschiedliche verfügbare Ansätze zum Stand der Technik in WSN betrachtet und die lokale Synchronisation der Sensorsystemknoten mittels eines standardbasierten Ansatzes mit globalen NTP Zeitserver umgesetzt.

Generell bietet das Testfeldsystem durch dessen modulare Ausgestaltung die Option weitere neue physische Technik, von Sensoren über die Energieversorgung bis zur Kommunikation, flexibel für deren Erprobung in unterschiedlichen Fragestellungen in realen Studiumgebungen einzusetzen.

5.3 Datenstrommanagement-Framework

Die Software und das Datenstrommanagementsystem bilden weiterhin eine Kernkomponente des Testfeldsystems. Hier laufen alle lokalen Daten zusammen, werden verwaltet, fusioniert und semantisch aufbereitet. Diese stehen dann über die Kommunikation als globales Weltmodell den Anwendungen und Nutzern zur Verfügung. Die nachstehenden Kapitel führen schrittweise über eine Übersicht in die Grundarbeitsweisen und Datenfusionsschritte des implementierten Datenstrommanagements ein und zeigen die Implementierung der zuvor entwickelten Testfeldarchitektur und der gewünschten Funktionen. Dazu wird im Kapitel 5.3.2 das verwendete Datenstrommanagementsysteme Odysseus vorgestellt sowie eigene notwendige Erweiterungen für EO-Sensoren aufgeführt. Die Datenfusionsschritte für optische Sensoren werden im Anschluss in Kapitel 5.3.3 anhand eines JDL- Datenfusionsmodells dargestellt. Für die Implementation der Testfeldarchitektur und des Fusionsmodells widmet sich das Kapitel 5.3.4 der DSMS- Server Seite sowie das Kapitel 5.3.5 der DSMS- Client Seite. Darauf folgend stellt das Kapitel 5.3.6 die Sensordaten-Metainformationen zur qualitativen Annotation der Datenströme dar. Kapitel 5.3.7 beschreibt das Datenspeichermanagement, gefolgt von der Beschreibung des Replay-Moduls in Kapitel 5.3.8, sowie des Simulations-Moduls in Kapitel 5.3.9. Eine abschließende Zusammenfassung stellt daraufhin in Kapitel 5.3.10 alle wichtigen Merkmale und Funktionen aus dieser Implementierung der Testfeldarchitektur dar.

5.3.1 Überblick

Für das Testfeld für Sensordaten-Fusions-, Kommunikationstechnologie- und Datenstromanalyse-Tools zur Umwelt und Verkehrsbeobachtung, auf Basis verteilter Sensoren, wird ein modulares Datenstrommanagement für die -Erfassung -Simulation -Wiederverwendung von Sensordaten benötigt. Wichtig ist dabei ein System zu verwenden, welches einen Open-Source-Ansatz berücksichtigt damit die Wiederverwertbarkeit und Erweiterbarkeit für weitere F&E-Vorhaben und zukünftige Anwendungen gewährleistet ist. An dieser Stelle sollen noch einmal die grundlegenden Aufgaben wiedergegeben werden:

- 1) *Onlineerkennung relevanter Situationen,*
- 2) *Sammlung von Daten für die weitere Analyse und*
- 3) *Wiederverwendung dieser Daten.*

Um dies zu ermöglichen wurde eine Testfeldarchitektur entwickelt und folgende gewünschte Funktionen für das Testfeld-Datenstrommanagement identifiziert:

- a) *Handling optische Sensoren / Videosensoren*
- b) *Unterstützung und Erweiterbarkeit für verschiedene Datentypen*
- c) *Verteilte Prozessierung, in dynamischen Umgebungen einsetzbar*
- d) *Adaptive und flexible Konfiguration von Sensoren zur Laufzeit*
- e) *Datenarchivierung*
- f) *Informationsqualitätsbearbeitung*
- g) *Validierung der Datenverwaltung*
- h) *Reproduzierbarkeit von Experimenten*
- i) *Verknüpfung von Simulation*

5.3.2 Datenstrommanagementsystem Odysseus

Um die oben genannten Anforderungen zu bewältigen und die entwickelte Testfeldarchitektur zu implementieren, wurde ein Datenstrommanagementsystem (DSMS) (Babcock et al. 2002) eingerichtet. Der Aufbau basiert auf dem Open Source DSMS-Framework Odysseus⁹. Dieses wurde an der Carl von Ossietzky Universität Oldenburg in der Abteilung Informationssysteme entwickelt. Im Allgemeinen könnte die Testfeld-Systemarchitektur auch mit anderen der zuvor genannten Datenstrommanagementsysteme implementiert werden. Da Odysseus als erweiterbares Framework für Datenstrommanagementsysteme konzipiert wurde und bereits erfolgreich in einer Vielzahl von Anwendungsszenarien (Bolles et al. 2010; Brand und Grawunder 2015) eingesetzt und erweitert wurde, bietet dieses eine umfangreiche Funktionsbibliothek (Kuka 2015) sowie eine Vielzahl der gewünschten Funktionen (Appelrath et al. 2012; Team Odysseus Project 2017). Weiterhin unterstützt das Framework die verteilte Verarbeitung auf mehreren DSMS-Instanzen, eine wesentliche Anforderung für die genannten Anwendungen mit dem Testfeld bei verteilten optischen Sensor-Systembetrieb. Es bietet weiterhin hohe Verarbeitungsgeschwindigkeiten für komplexe Operationen, beispielsweise für die Objekterkennung, Datenzugriff, Verarbeitung und Fusion, dabei ist das DSMS-Framework vollständig in Java implementiert.

⁹ <http://odysseus.offis.uni-oldenburg.de/>

Um allen gewünschten Funktionen des Testfeldsystems nachzukommen, wurden weitere Funktionen in das DSMS-Framework implementiert und somit auch das Testfeldsystem erweitert. Deren Details werden im Verlauf dieser Kapitel näher beschrieben, diese sind:

- Einer Testfeld GUI-Applikation für die komfortable Administration und Anwendung im Testfeldbetrieb sowie zur Repräsentation des Umweltlagebildes für mehrere Nutzer.
- Eine JAX-WS Web-Service-Schnittstelle für eine adaptive flexible Sensorkonfiguration während der Laufzeit.
- Neue Videofeatures sowie Videocodecs für das Handling optischer Sensoren und deren Erweiterbarkeit.

5.3.2.1 Grundlagen

Das in dieser Arbeit eingesetzte DSMS-Framework Odysseus verwendet ein klar formuliertes Datenstrommodell auf Basis von (Krämer 2007). Das Modell bietet die Möglichkeit einen physischen Datenstrom in einen logischen Datenstrom umzuwandeln und darauf temporale relationale Operatoren mit gut definierter Semantik anzuwenden, während die konkrete Implementierung auf physischer Ebene durchgeführt wird. Ein Operator erfüllt im Wesentlichen eine spezifische Operation, wie zum Beispiel eine Selektion oder einen Filter, wobei die gerichtete Verknüpfung mehrerer Operatoren einen Anfrageplan im Datenstrom erstellen und somit die Validierung der Datenverwaltung ermöglicht. In einem logischen / physischen Datenstrom werden Informationen eines Stromelements durch Tupel e repräsentiert. In einem logischen Datenstrom ist hierbei ein Tupel definiert durch eine potentiell unendliche Multimenge von Elementen (Nutzdaten) zu einem gültigen Zeitpunkt. Wobei durch DSMS interne Definitionen berücksichtigt wird, dass in einem logischen Datenstrom mehrere Elemente mit gleichem Tupel und gleichem Zeitstempel vorliegen können. Diese Definitionen jedoch klar den zeitlichen Ablauf der Gültigkeit eines Datentupel (positiv-negativ- / intervall-Ansatz) festlegen und Elemente somit separat verarbeiten können. Um Messungen deterministisch verarbeiten zu können wird in dieser Arbeit der Intervall-Ansatz verwendet mit der Tupel-Notation $(e, [ts, te))$, wobei $ts < te$ ein halboffenes Gültigkeitsintervall mit Startzeit ts und Endzeit te darstellt. Weitere detaillierte Beschreibungen hierzu sind in den Arbeiten von (Krämer 2007) sowie (Kuka 2015) übersichtlich aufgeführt.

5.3.2.2 DSMS-Architektur

Die Architektur des Datenstrommanagementsystems Odysseus ist, analog zu der Testfeldarchitektur in Kapitel 4.1 und auch der zu Anfang vorgestellten Architektur für optische Sensoren in Kapitel 2.1.1, in drei Ebenen unterteilt, dargestellt in Abbildung 5.9. Eine Sensorebene zu Beginn, darauf aufbauend eine Datenverarbeitungsebene in der Mitte, sowie eine Anwendungsebene im oberen Architekturteil.

- In der Sensorebene werden kontinuierlich Sensordaten als Datenstrom für die folgenden Systemebenen bereitgestellt. Hierfür bietet das System **Transport - Protokoll - Daten- (TPD) Handler** an, welche ein anwendungsspezifisches Datenformat (Datentupel) in eine interne Repräsentation umwandeln, exemplarisch dargestellt in Abbildung 5.10, links.
- In der Datenverarbeitungsebene werden die einzelnen, für die Verarbeitung notwendigen, **Verarbeitungsoperatoren** bereitgestellt. Eine Verknüpfung mehrerer Operatoren erlaubt es ganze Anfragepläne zu erstellen, exemplarisch dargestellt in Abbildung 5.10, rechts. Jeder Sensortyp wird durch einen Satz von Abfragevorlagen definiert, die z. B. in PQL (Procedural Query Language) geschrieben sind, eine Odysseus-spezifische Abfragesprache, welche die Erstellung eines Abfrageplans ermöglicht, indem sie verschiedene Operatoren (wie Filter, Joins oder Aggregationen) konfiguriert und verbindet. PQL ist dabei eingebettet in eine spezielle Sprache namens **Odysseus Skript** (Brand und Grawunder 2015), sehr dynamisch und ermöglicht die Nutzung von Operatoren die auch zur Laufzeit hinzugefügt werden können. Weiterhin können spezifische Metadaten über ein Metadatenframework zur Verfügung gestellt werden, welche dann zusammen mit dem Datenstrom als Ergebnis in Operatoren verarbeitet werden, oder über eine Anfrage durch das **Query- Interface** in der Anwendungsschicht genutzt werden.
- In der Anwendungsebene werden **Verarbeitungsanfragen** durch Anwendungen an das System gerichtet und kontinuierliche Verarbeitungsergebnisse als **Datenstrom (Ergebnistupel)** empfangen. Unterschiedliche **Verarbeitungssprachen** werden dabei durch Parser aus dem **User-Management** unterstützt. Um **Ergebnistupel** in anwendungsspezifische Formate zu überführen, können hierfür auch **TPD-Handler** verwendet werden, welche exemplarisch in Abbildung 5.10, links dargestellt sind.

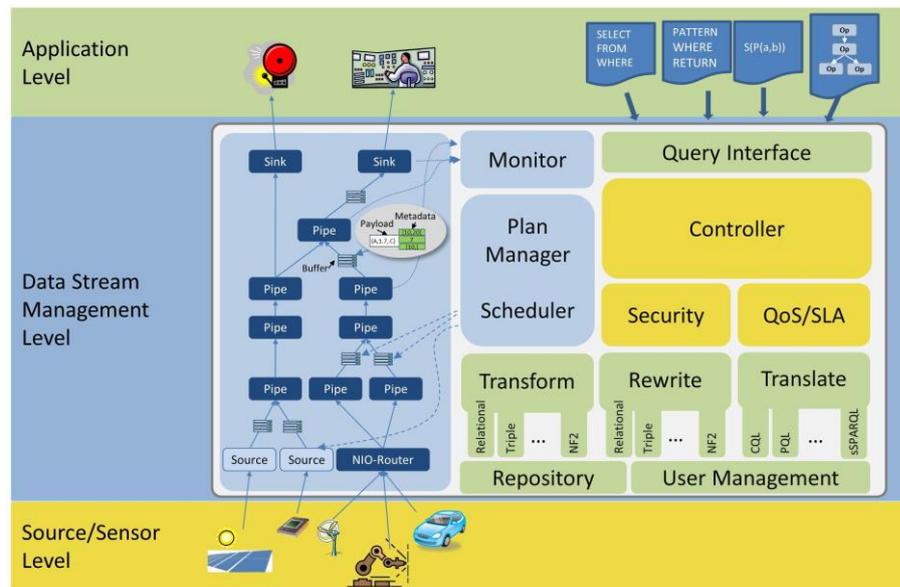


Abbildung 5.9: Architektur Odysseus Datenstrommanagement-System mit drei Ebenen: Sensor-, Datenstrom- und Anwendungsebene. Quelle: (Appelrath et al. 2012)

Innerhalb der Architektur wird zwischen einem Server- und einem Clientteil unterschieden:

- Das Kernsystem Odysseus Server enthält die Sensordatenverarbeitung, die Datenstrom-Abfrage-Schnittstelle sowie auch die Benutzerverwaltung.
- Odysseus Studio wird für die Entwicklung und Implementierung von Abfragen und Odysseus Server-Administration auf Clientebene verwendet.

Das Odysseus-Framework ist komponentenbasiert und für die Erweiterbarkeit mit der Open Services Gateway Specification (OSGi) Service Plattform konzipiert (OSGi Alliance 2007), einem Java-basierten Applikationsserver welcher es erlaubt das DSMS für verschiedene Anwendungsdomänen zu entwickeln und dadurch auch für verschiedene Datentypen zu erweitern. Dieser Applikationsserver bietet weiterhin Bündel für Datenintegration, Datenfusion, Speicherung und Datenqualitätsdarstellung. Die Installation und Aktualisierung von Bündeln kann ohne Neustart des Systems erfolgen, was zu einer hohen Flexibilität und Laufzeitanpassung führt. Dadurch können alle verteilten Sensorsystemknoten im Testfeld automatisiert auf Server und Clientebene mit Updates versorgt werden. Weiterführende Informationen sind in (Jacobi und Grawunder 2008; Bolles et al. 2010; Appelrath et al. 2012; Brand und Grawunder 2015) für den interessierten Leser verfügbar.

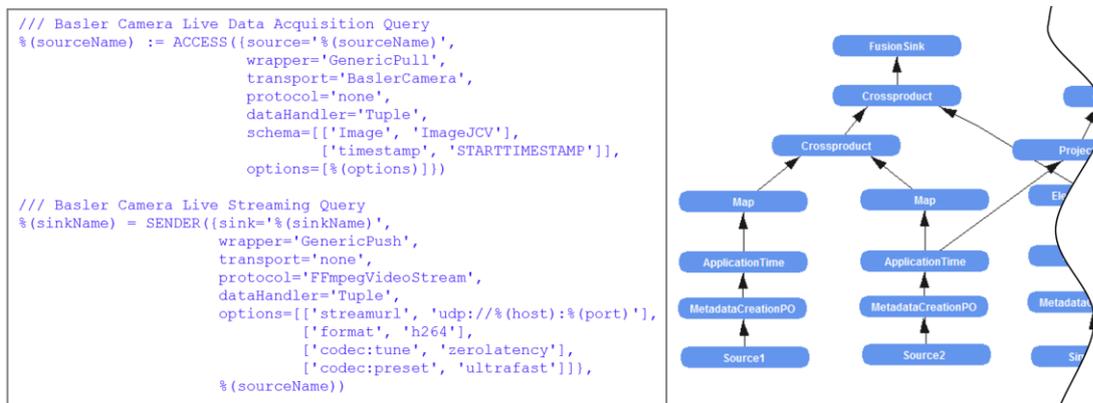


Abbildung 5.10: Exemplarisch Subscriber-PQL-Query im DSMS mit Source- und Sink- Transport- Protokoll- Daten- (TPD)-Handler-Definition (links). In diesem Beispiel für das Einlesen von Videodaten und einen Livestream einer visuellen Kamera im Testfeld. Exemplarischer Abfrageplan (Query-plan) mit mehreren Quellen (rechts), welche mit unterschiedlichen Abfragevorlagen verknüpft werden und als sink (Datensenke) für die Anwendungen zur Verfügung stehen

5.3.2.3 Datenströme und Zeit

Wie bereits zuvor bei der Netzwerkarchitektur in Kapitel 5.2.4.2 betrachtet, benötigen verteilte Prozesse im Netzwerk eine gemeinsame Zeitbasis um Datenströme zusammenführen und weiter fusionieren zu können. Bei der kontinuierlichen Datenstromverarbeitung werden die zu verarbeitenden Daten aktiv vom Sensor erzeugt. Im DSMS ist im Vorfeld nicht bekannt, zu welchem Zeitpunkt und in welcher Art die Informationen (Sensordaten) gesendet werden und eintreffen. Für die datengetriebene Verarbeitung können dementsprechend erst beim Eintreffen der Informationen Zeitstempel vergeben werden. Alternativ können Sensoren auch ihren eigenen Zeitstempel mitsenden, welcher dann als Messzeitpunkt für Verarbeitungsanfragen, von im zeitlichen Zusammenhang stehenden Daten, verwendet werden kann. Für einen kontinuierlichen Datenstrom können Zeitstempel auf Gültigkeitszeitintervalle mittels Fenstern (Teilausschnitte) erweitert werden, um unendliche Datenströme zu verarbeiten. Die Definition für ein vordefiniertes Zeitintervall, in dem dies als gültig betrachtet wird, erfolgt anwendungsabhängig mit der zugehörigen Anfrage auf den Datenstrom innerhalb eines Operators. Nach Ablauf dieses Intervalls kann das Tuptelelement dann aus dem Speicher des Operators entfernt werden.

5.3.2.4 Verteilte Datenstromverarbeitung im Netzwerk

Wie in der Testfeldarchitektur verdeutlicht, sollen die Sensorsystemknoten auf lokaler Sensorebene eingehende Daten vorverarbeiten und deren jeweiliges lokales Weltmodell, deren Umweltlagebild auf Grundlage der verfügbaren lokalen Sensorinformationen über die Kommunikationsebene an die globale Sensorebene, für das globale Weltmodell zur Verfügung stellen. Hierfür wird eine verteilte Prozessierung des Datenstrommanagements benötigt.

Das Odysseus-DSMS-Framework stellt hierfür eine Erweiterung „OdysseusNet“ zur Verfügung, mit der eine verteilte Datenstromverarbeitung unter Verwendung eines Netzwerkes von miteinander verbundenen Odysseus-Instanzen gebildet wird (z. B. über LAN oder WLAN). OdysseusNet ist eine Summe von mehreren kleineren Features, welche spezifische Funktionen, Möglichkeiten und Schnittstellen enthalten. Damit können OdysseusNodes neue Datenquellen definieren, welche von anderen OdysseusNodes genutzt werden können. Um das Netzwerk in logischen Subnetzwerken aufzuteilen, kann jeder OdysseusNode einer NodeGroup zugeordnet werden. Nur Knoten die sich in derselben Gruppe befinden sind verbunden und können miteinander kommunizieren. Standardmäßig befindet sich jeder OdysseusNode in derselben Gruppe (OdysseusGroup). Dies kann jedoch in der Konfiguration von OdysseusNet geändert und für das Testfeldsystem angepasst werden. Mit diesem Verhalten wird ein dezentrales und unstrukturiertes Netzwerk von Knoten aufgebaut, identisch zu der beschriebenen vermaschten Netzwerktopologie in Kapitel 4.2.2.

Standardmäßig werden alle Quellen im Netzwerk automatisch ohne weitere Interaktionen verteilt. Wenn einem OdysseusNode neue Datenquellen (lokales Weltmodell) aus dem Netzwerk zur Verfügung stehen werden diese dem lokalen Sensorsystemknoten-DSMS ebenfalls als Quellen / Ressourcen (lokales Weltmodell, Umweltlagebild) hinzugefügt. Der Nutzer / die Anwendung greift somit nur über eine globale Sensor-Ebene auf die so verfügbar gemachten Ressourcen (lokalen Weltmodelle) zu und kann daraus das globale Weltmodell an jeder verteilten DSMS-Instanz im Netzwerk generieren. Die Abfrageverteilung in OdysseusNet wird dabei in drei Kernphasen unterteilt: Partition, Modifikation und Allokation. Aus Implementierungsgründen wurden zwei zusätzliche Phasen integriert: Vorverarbeitung vor Partition und Nachverarbeitung nach Allokation.

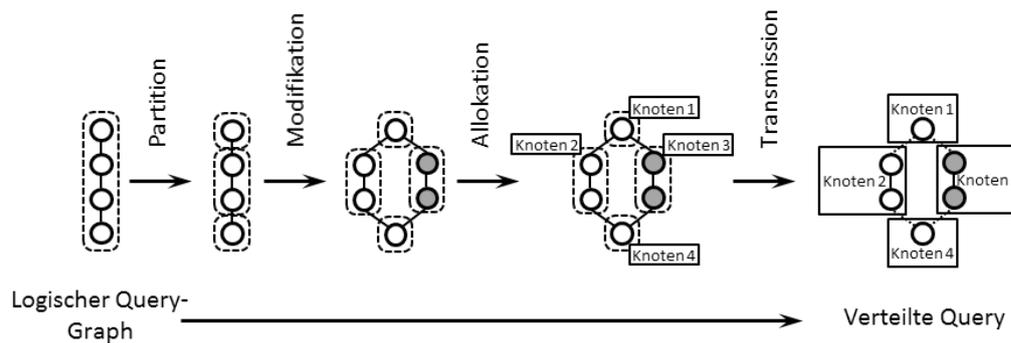


Abbildung 5.11: Exemplarisch verteilte Datenstrom-Abfrageverteilung mit vier vernetzten, geographisch verteilten Sensorsystem-Netzwerkknoten in OdysseusNet mit einzelnen Prozessphasen, Partition, Modifikation und Allokation zur Generierung des globalen Weltmodells aus mehreren lokalen Weltmodellen

Abbildung 5.11 zeigt die drei zuvor erwähnten Phasen sowie die Übertragungsphase. Am Anfang übersetzt das DSMS-Framework Odysseus die Abfrage in einem logischen Graphen. Dieser logische Graph wird vorverarbeitet und dann partitioniert. Das Ergebnis der Partitionsphase ist eine Sammlung von Abfrageteilen die in der Modifikationsphase individuell modifiziert werden. Die Modifikationsphase ist dabei optional. Danach entscheidet die Allokationsphase welcher Abfrageteil auf welchem OdysseusNode ausgeführt werden soll. Schließlich werden die Abfrageteile an die ausgewählten Knoten übertragen.

5.3.3 Testfeld Datenfusionsmodell für optische Sensoren

Unter Bezugnahme auf optische Sensoren kann die Datenfusion auf drei semantischen Ebenen erfolgen, welche unterschiedlichen Aufwand für die Einrichtung, Konfiguration und Analyse von optischen Sensoren sowie deren Sensordatenströmen durch den Nutzer oder Systemadministrator erfordern:

- Zeitliche Synchronisation
- Merkmal-Ebene
- Modell-Ebene

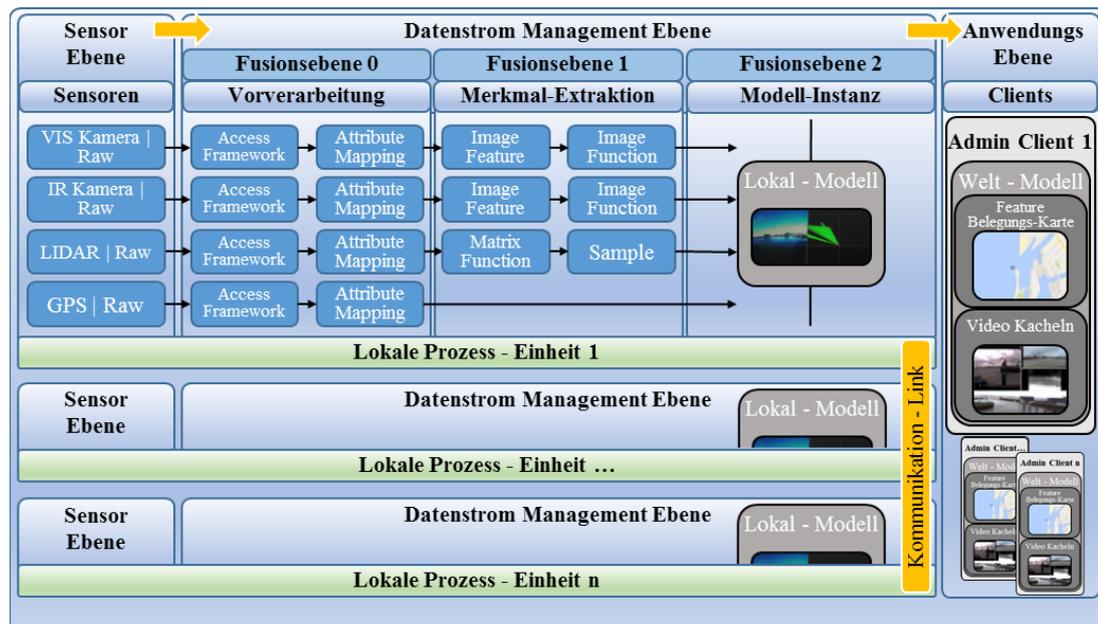


Abbildung 5.12: Verarbeitungs- und Datenfusionsschritte im DSMS-Framework, ausgehend von der Sensor-Ebene über Vorverarbeitungsschritte und Feature Annotation zur lokalen Fusion als lokales Weltmodell im DSMS-Framework. Mehrere verteilte Prozesseinheiten (Sensorsystemknoten im Netzwerk) integrieren lokale Weltmodelle über Kommunikationsverbindungen (globale Sensorebene) zu einem Weltmodell auf der Anwendungsebene

Für die kategorisierten Verarbeitungsschritte und Datenfusionsebenen dieses DSMS-Frameworks zeigt Abbildung 5.12 die Umsetzung der in diese Arbeit entwickelten Testfeldarchitektur zur Erstellung eines globalen Weltmodells gemäß dem JDL-Datenfusionsprozessmodell. Hierbei sind mehrere verteilte lokale DSMS-Prozesseinheiten (bspw. Sensorsystemknoten in der realen Welt) untereinander dargestellt, die Fusionsschritte werden anhand einer realen Testfeldinstanz beschrieben:

- 1) Auf *Sensor-Ebene* werden mehrere Testfeld-Sensoren und deren spezifischen Protokoll-Handler (Rohsensordaten) mit der Datenstrommanagement-Ebene verbunden. Basissensoren und Protokollhandler sind: Visuelle Kamera (Basler acA2040-gc, C ++ SDK), Infrarot Kamera (Optris PI 450, SDK), LIDAR-Laserscanner (SICK LMS 110 und LMS 151, TCP/IP) sowie GPS (Navilock NL-602U, USB / RS232, NMEA0183 (NMEA, 2002)). Dies erfolgt für jede lokale, geographisch verteilte, Prozesseinheit (Sensorsystemknoten).

- 2) Fusionsebene 0 bietet *Vorverarbeitungsschritte* durch ein *Access-Framework* und *Attribut-Mapping*. Das *Access-Framework* führt eine Kommunikationskonfiguration durch, eine Übertragung von Rohsensordaten zu einer gemeinsamen Datenstruktur und Daten-Fusionsbasis. Das Ergebnis ist eine Sensorquelle mit Transport-, Protokoll- und Daten-Handler, z. B. ein Tupel-Element für einen Frame aus einem Video. Das *Attribut-Mapping* bestimmt, welche Datenelemente in dem Ausgangsstrom einer ankommenden Sensorquelle enthalten sind, zum Beispiel Video-Streams (Access Subscriber-PQL-Query in Abbildung 5.10, links). Analog können auf diese Weise weiterhin Metadaten in Form von Sensorqualitäts- und Validierungselemente für nachgeschaltete Operatoren annotiert werden, z. B. Kalibrier-Flag's der IR-Kamera, Remissionskoeffizienten vom LIDAR-Laserscanner oder GPS-Sensorqualität bzw. die Anzahl der empfangenen Satelliten. Die einzige Verarbeitung die vom System in dieser Ebene bereitgestellt wird, ist eine zeitliche Synchronisation, die einfachste Form der Sensordatenfusion. Hiermit können lokal vorliegende Daten von mehreren Sensoren auf dem gleichen Bildschirm in verschiedenen Fenstern visualisiert werden. Alle Operationen in dieser Fusionsebene werden dabei immer noch verteilt und parallel auf den jeweiligen lokalen Prozesseinheiten (Sensorsystem-Netzwerkknoten) durch deren lokalen DSMS-Instanzen ausgeführt.
- 3) Fusionsebene 1, die *Merkmalebene*, dient der Objektverfeinerung eines Sensordatenstroms und ist gleichzusetzen mit der JDL-Fusionsebene 1. Ein Merkmal ist ein messbarer Datenfaktor, beispielsweise die Temperatur des Wassers an einer bestimmten Stelle, oder die Distanz zu einem Objekt an einer bestimmten Polarkoordinate, gemessen durch LIDAR-Scanner. Wenn mehrere Sensoren diese Informationen bereitstellen, kann eine Anwendung oder Benutzer eine Aggregationsfunktion definieren, um mehrere Temperaturwerte zu verschmelzen. Solche Aggregationen können mit Standard-Datenstrom-PQL-Abfragen definiert werden. *Image-Feature*-Operatoren werden an dieser Stelle auf Kameraquellen angewandt, um die Bildgröße von Rohbildern von 4k-Pixel-Videokameras zu verändern oder die Temperaturwert-Matrix von IR-Kameras in ein verwendbares Graustufenbild zu überführen, welches für den Endnutzer interpretierfähig ist. Neue *Image-Function* können weiterhin mit einem neuen TPD-Handler zugeordnet werden, in diesem Fall durch die

Implementierung von FFmpeg¹⁰ Programmbibliotheken. Damit stehen Video-Komprimierungsalgorithmen von Drittanbietern zur Verfügung um Videodatenströme, für effektive vernetzte Streaming-Operationen zu komprimieren (Sender Subscriber-PQL-Query in Abbildung 5.10, links). Weiter bietet die *Matrix-Function* beliebige Funktionen um mit Matrizen aus LIDAR-Sensorsdatenströmen zu arbeiten. Aufgrund der hohen Lidar-Abtastfrequenz definiert der *Sample-Operator* LIDAR-Datenstrom-Tupel, damit diese zeitlich koexistent mit den Kamera-Tupel vorliegen. Die Ergebnisse dieser Fusionsebene stellen Daten-Senken mit Live-Streaming-Features der Kameras und LIDAR-Laserscanner zu UDP (User Datagram Protocol) in den jeweiligen lokalen DSMS-Instanzen zur Verfügung.

- 4) Die Fusionsebene 2, der *Modellebene*, dient der Situationsverfeinerung und ist gleichzusetzen mit der JDL-Fusionsebene 2. Hier werden lokale Weltmodelle auf Basis der lokalen Sensoren erzeugt, welche physisch mit einem Sensorsystemknoten verbunden sind. Das lokale Weltmodell aus einer DSMS-Instanz (lokale Prozesseinheit) steht über das lokale Netzwerk einem Benutzer zur Verfügung. Dieses bietet Live-Informationen aus der unmittelbaren Umgebung (bspw. aus dem Sichtbereich der Kameras, dem Erfassungsbereich der Lidar-Scanner) über frei definierbare Videostream-Kacheln und über eine zweidimensionale Belegungskarte auf Basis der lokalen Sensorquellen, beispielsweise eines Hafensbereichs oder eines Schiffs, sowie GPS-Informationen des Sensorsystemknotens.
- 5) Auf der *Anwendungsebene* (der höchstzulässigen Ebene) stehen mehreren Nutzern / der Anwendung ein Weltmodell über die Kommunikation zur Verfügung. Alle im Testfeld-Netzwerk verfügbaren DSMS-Instanzen und deren dezentral prozessierten lokalen Weltmodelle werden an die globale Sensorebene in der Architektur übergeben. Deren jeweiliges lokales Weltmodell wird in das globale Modell eingefügt und ein umfassendes Umweltlagebild gebildet. Ein Beispiel-Welt-Modell würde die Karte des Hafens einschließlich und deren aktuellen Features bzw. Status aller Objekte

¹⁰ <https://ffmpeg.org/>

enthalten. Ein globales Modell verschmilzt, reinigt und filtert Sensordaten aus allen verfügbaren Datenquellen, um hohe semantische Ebenen zu erhalten, die beispielsweise für eine Situationserkennung und Entscheidungsfindung an Land oder an Bord relevant sind. Wenn keine ausreichende Kommunikationsverbindung zwischen verteilten Verarbeitungseinheiten vorhanden ist, werden Weltmodelle nur mit den Sensoren erzeugt, die für verbundene Sensorsystemknoten im Netzwerk verfügbar sind. Mehrere Abonnenten (verteilte Teilnehmer) können über Netzwerkverbindungen auf dieses Modell zugreifen, die Onlineerkennung relevanter Situationen wird Netzwerkübergreifend lokal ermöglicht. Um den Benutzer von der Formulierung von Datenstrom-Abfragen zu entlasten und den Testfeldbetrieb in realen Studienumgebungen zu erleichtern, wurde eine Testfeld GUI-Anwendung „Admin-Client Applikation“ entwickelt. Diese bietet über eine grafische Benutzeroberfläche dem Anwender die Möglichkeit u. a. für eine flexible visuelle Darstellung der Modelle und wird in Kapitel 5.3.5 detaillierter behandelt.

5.3.4 Server-seitige Software Implementierung

Abbildung 5.13 zeigt die Oberfläche der Odysseus Studio IDE (Integrierte Entwicklungsumgebung), welche Client- und Serverfunktionen zu einem monolithischen Produkt vereinen. Weiterhin steht auch ein eigenständiger Server zur Verfügung um eine zentralisierte Wartung und Updates für das gesamte Testfeldsystem zu ermöglichen. Jeder Sensorknoten führt eine Instanz von Odysseus Server aus, welcher durch Sensorverwaltungs-bündel erweitert werden kann und die Server-seitige-Architektur-Funktionalitäten implementiert. Das Testfeldsystem, bzw. die Sensorsystemknoten verwenden jeweils ein WIN 7, 64 bit Betriebssystem mit Java 8 Runtime Environment (Oracle, USA). Eclipse Release 4.5.1 wurde als Rich Client-Plattform (RCP) sowie die Remote Application Plattform (RAP) als integrierte Entwicklungsumgebung (IDE) verwendet.

Eine adaptive flexible Sensorkonfiguration wurde mittels einer JAX-WS-Schnittstelle (Java API for XML Web Services (Sun Microsystems 2009)) realisiert. Diese bietet Methoden zum Hinzufügen, Konfigurieren und Entfernen von Sensoren während der Laufzeit des Systems und weiterhin zum Starten und Stoppen einer Testfeld-Protokollierung. Auch können einzelne Datenstromabfragen, die beliebige

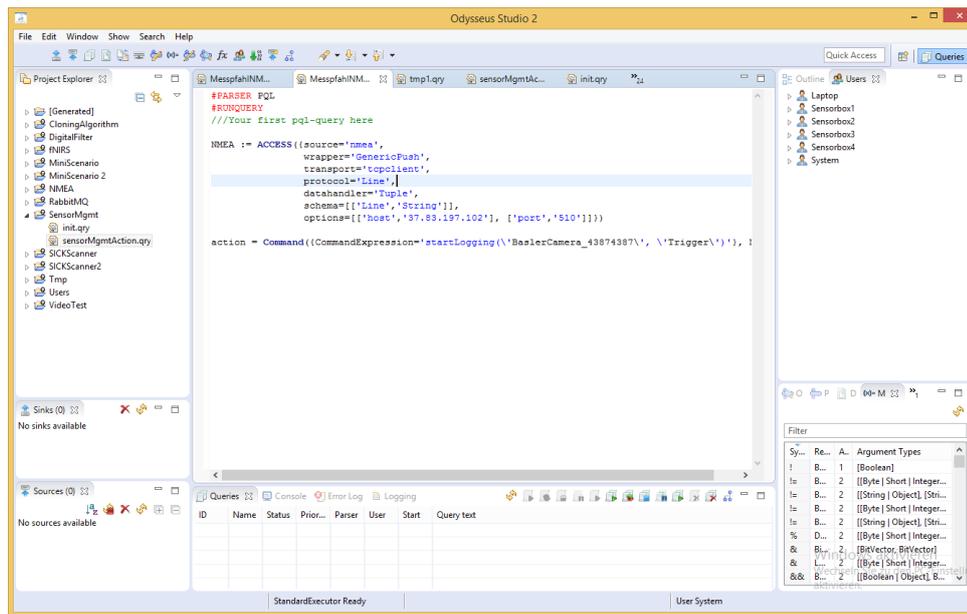


Abbildung 5.13: Oberfläche von Odysseus Studio IDE (Integrierte Entwicklungsumgebung), welche Client- und Serverfunktionen des DSMS-Framework im Testfeldsystem zu einem monolithischen Produkt vereint

Sensoreingänge kombinieren, für die Onlinedatenverarbeitung, die Ereignisgenerierung und die Abfrageanpassung gestartet und gestoppt werden. Neue heterogene (optische) Sensortypen können ebenfalls in das DSMS implementiert werden.

Hochauflösende Videokameras liefern Rohbilder mit einer hohen Framerate. Am Beispiel einer visuellen Kamera, 2048×2048 Pixel \times 12 bit/s \times 25 Hz, strömen ca. 1200 Mbit/s bzw. 150 MB/s an Rohdaten in das System, welche ineffektiv auf der Festplatte zu speichern oder per Netzwerk zu senden bzw. zu verteilen wären. Hierfür wurde eine plattformübergreifende Lösung mittels Videokomprimierungsalgorithmen durch eine Ffmpeg Bibliothek als zusätzliches *FfmpegVideoStream*-Bundle sowie OpenCV Bibliotheken in das DSMS implementiert. Damit können Videostreams virtuell serverseitig codiert und clientseitig encodiert werden. Das Handling und der gewünschte Codec ist dabei flexibel, je nach Erfordernissen der Anwendung, über die jeweiligen TPD-Handler *options* einstellbar, exemplarisch dargestellt in Abbildung 5.10, links. Zur Auswahl sollte berücksichtigt werden das einige Formate proprietär sind und eine Open-Source Nutzung ggf. hierdurch eingeschränkt wird. Durch die Implementierung der neuen *Image-Function* Videofeatures werden im

Rohdatenspeicher auf einem Speichermedium somit beispielsweise nur ca. 40 Mbit/s mit voller Videoauflösung und verlustfreier Kompression mit h264-Codec im standardisierten .mp4-Format belegt. Mit einer geringeren Bildauflösung bzw. limitierten Bitrate, können Videostreams auf ca. 400 kbit/s komprimiert und hierdurch sehr gut über das Netzwerk, übertragen werden, wie in Kapitel 5.4.3 näher betrachtet.

Wie zuvor in der Einführung der Infrarotkameratechnik in Kapitel 2.5.2 geschildert, hat sich noch kein allgemein standardisiertes Videoformat für mikrobolometer IR-Kameras etabliert. Um gemeinsame Videokompressions- und Streaming-Algorithmen verwendet werden können, wird hierfür der Puffer des von der Kamera erzeugten 16-Bit-1-Kanal-Temperaturbildes als 32-bit-RGBA-Bild mittels eines neuen TPD-Handlers uminterpretiert und mit einem standardisierten FFV1-Codec verarbeitet. Die Speicherung erfolgt somit als „nicht konformes“ 32-bit pixel .avi-Format und bedarf einem eigenen virtuellen Decoder für eine systemfremde Wiederverwendung.

Folgende spezifische Sensortypen und Datenformate wurden für die Testfeldapplikation, in der Serversoftware genutzt bzw. neu implementiert:

- Visuelle- und Infrarotkameras: Kameras, die einen Datenstrom von RGB- oder Temperaturbildern liefern. Video-Bundle (JavaCV, OpenCV) erweitern Odysseus, um die Video-Streaming- und Video-Aufnahmefunktionalität zu unterstützen. Dazu gehören ebenfalls verschiedene DirectShow-zugängliche USB-Kameras
- LIDAR: Laserscanner, die Abstände in einer Ebene um den Sensor scannen. Die Ergebnisse werden als Polarkoordinaten-Scan-Distanz-Karte dargestellt.
- NMEA-Sensoren: Sensoren, die Daten im NMEA-Format (NMEA 2002) über TCP / UDP oder serielle Verbindungen bereitstellen. Dazu gehören bspw. (Differential) GPS-Sensoren und Windgeschwindigkeitssensoren.
- Textdateisensoren: Durch die Kombination von DSMS-Operatoren können protokollierte Daten von anderen Sensoren oder ganzen Systemen aus einer Textdatei kontinuierlich, online ausgelesen werden. Hiermit besteht die Möglichkeit systemübergreifend Informationen in das DSMS einzubringen, ohne einen Eingriff in ggf. fremde sensible Systemstrukturen (z. B. von dritter Seite aus bereitgestellt) durchführen zu müssen. Beispielsweise um externe Zeitstempel der Protokollfrequenz und Messwerte (z. B. Wasserstand, Temperatur, Salzgehalt, Wind, Verkehrsinformationen, etc.) zu erhalten und zu verarbeiten.

5.3.5 Client-seitige Software Implementierung

Eine „Admin-Client Anwendung“ stellt dem Testfeld eine GUI-Applikation für die komfortable Administration und Anwendung im Testfeldbetrieb zur Verfügung. Diese dient u. a. der Repräsentation des Umweltlagebildes, entweder auf lokaler Sensorebene (lokales Weltmodell) für einen Nutzer oder auf globaler Sensorebene (globales Weltmodell) für mehrere verteilte Nutzer.

Mit Hilfe einer grafischen Benutzeroberfläche, welche in Abbildung 5.14 dargestellt ist, kann der Benutzer über eine Fernverwaltung neue Sensoren im Testfeldsystem registrieren, die Datenarchivierung starten und stoppen oder gespeicherte Daten wiedergeben. Außerdem bietet die Oberfläche Visualisierungen für jeden Sensortyp an. Weiterhin werden hierüber komplette Testfeldszenen definiert und aufgezeichnet, sowie später auch wiedergegeben. Auch die Simulation von kompletten Szenarien kann hierüber administriert werden, einzelne Details werden in den folgenden Abschnitten beschrieben. Die Admin-Client Anwendung bietet im Testfeld:

- Standalone-Anwendung
- Grafische Benutzeroberfläche zur Administration
- Verbindet und administriert mehrerer Sensormangementinstanzen
- Hinzufügen und entfernen von Sensoren während der Laufzeit
- Jederzeit Aufzeichnungen beginnen und beenden
- Wiedergabe aufgenommenen Szenen
- Zugriff auf Simulation

5.3.6 Sensordaten Metainformation

Um eine qualitätssensitive Verarbeitung und Wiederverwendung der Daten zu ermöglichen werden Metainformationen der Sensoren und der Umwelt in der diese sich befinden benötigt. Bezüglich der Informationsqualitätsbearbeitung wurde bereits ein ausführliches Konzept (Kuka und Nicklas 2014) in Odysseus implementiert welches eine Wahrscheinlichkeitsverarbeitung anhand von Datenstrominformationen und weiterer Metadaten, ermöglicht. Die spezifische Zuordnung von Metadaten wird durch entsprechende Protokollhandler definiert, diese können dann in das DSMS-Testfeldsystem aufgenommen werden. Standardmäßig werden zu dem jeweiligen Datenelement (Tupel) der: Zeitstempel in UTC oder UNIX-Zeit, die Geräte ID (Seriennummer) oder beispielsweise der Kalibrier-Flag-Status der IR-Kamera oder die

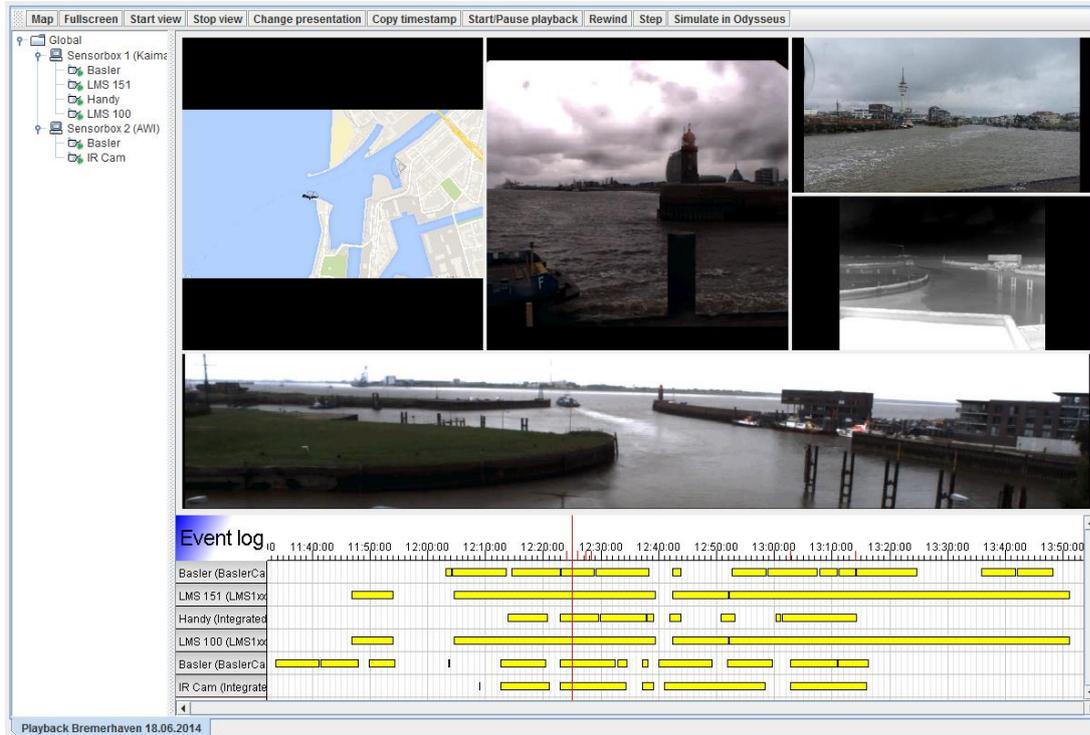


Abbildung 5.14: Grafische Oberfläche der Admin-Client Anwendung im Wiedergabemodus mit erfassten Szenen (globales Umweltlagebild) aus dem Studiengebiet des Hafens Bremerhaven, Geestemündung. Alle im Netzwerk verfügbaren Quellen der verteilten DSMS-Instanzen sind als Ressourcen für das globale Weltmodell verfügbar und werden in variablen Ansichten dargestellt

GPS-Empfangsqualität sowie LIDAR-Scanner Metadaten übernommen. Im Bereich der optischen Strömungsmessung werden die Zeitstempel genutzt um absolute Wasser-Strömungsgeschwindigkeiten berechnen zu können und valide Messdaten- Intervalle zu filtern. Alle zusätzlichen Metadaten werden dabei, genauso wie die Zeitstempel, mittels DSMS-Operatoren von der Eingabe in die Ausgabe kopiert oder können selbst durch einen Operator weiter verändert oder beliebig mit anderen Metadaten oder Rohsensordaten kombiniert werden. Die Trennung zwischen Nutzdaten und Metadaten als Qualitätsinformation hat den Vorteil, dass eine deterministische Verarbeitung unter Berücksichtigung der Vollständigkeit und der Konsistenz erfolgen kann ohne Verwendung von probabilistischen Operatoren und umgekehrt (Kuka 2015). Einige statische Metadaten von optischen Sensoren liegen weiterhin parallel zum DSMS-Testfeldsystem in separaten Konfigurationsdateien vor

und werden Sensor-Herstellerabhängig gehandhabt. Diese statischen Metadaten können bei Bedarf zu einer Auswertung hinzugezogen werden und dienen weiterhin zur erstmaligen Einrichtung oder Kalibrierung der Sensoren, beispielsweise für die VIS- oder IR-Kameras. Weiterhin ermöglichen diese statischen Metadaten mehrere identische Sensoren mit den gleichen Einstellungen, bspw. für die Belichtungszeit oder den Farbabgleich, in einer Testfeldapplikation zu versehen. Diese Einstellungen werden pro Applikationseinsatz in eine Konfigurationsdatei abgespeichert und sind damit reproduzierbar und wiederverwendbar abrufbar.

5.3.7 Datenspeichermanagement

Um neue Anwendungsfälle und Applikationen innerhalb der bestehenden Testfeld-Infrastruktur zu testen und zu evaluieren oder Software weiterzuentwickeln, werden nicht immer neue, teure Live-Szenarien und optische Sensoren benötigt. Vielmehr bietet eine solide Datenbasis die Möglichkeit Experimente reproduzierbar zu gestalten und auch an andere wissenschaftliche Nutzer zu teilen um bspw. externe Evaluationen zu ermöglichen. Die Experimentierplattform ist daher auch für das Data Mining wichtig, die Erhebung von Grundversuchsdaten und den Austausch von Simulationswerkzeugen. Aufgezeichnete Daten sollten retrospektiv genutzt werden, um weitere Entwicklungen auszuschöpfen.

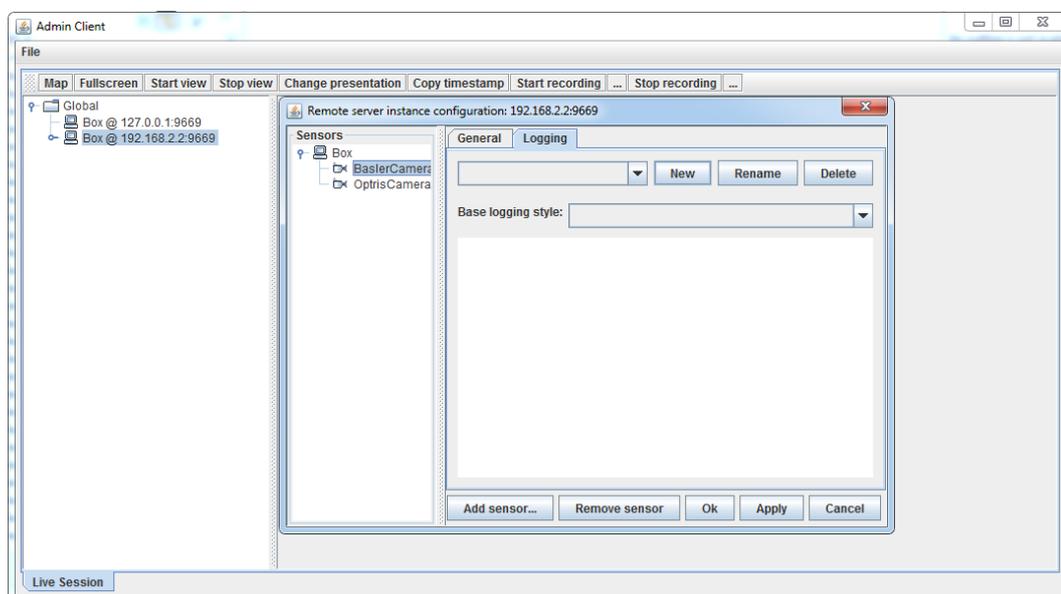


Abbildung 5.15: Grafische Oberfläche der Admin-Client Anwendung zur Konfiguration von Aufnahmen von Sensordaten bzw. kompletter Szenarien

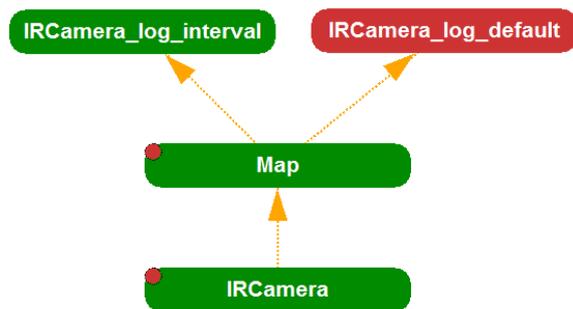


Abbildung 5.16: Exemplarische Abfragegrafik für einen optischen Sensor (Infrarotkamera) mit zwei aktiven Protokollierungszweigen, die einen Verarbeitungsoperator teilen

Die Archivierung von einzelnen Sensordaten incl. Metadaten, oder auch kompletten Szenarien erfolgt ähnlich wie die Erstellung eines Weltmodells aus dem Admin-Client-Interface heraus, dargestellt in Abbildung 5.15. Die ursprüngliche Sensor-Datenverarbeitungs-Instanz wird dabei sowohl für Livedaten, als auch für aufgezeichnete Daten wiederverwendbar um die Originalszene später wiederzugeben. Eingangsquellen (Live-Sensordaten) können separat an eine Aufzeichnungskategorie adressiert werden, um die gewünschte maximale Dateigröße (Chunks) einzurichten, das Aufzeichnungsintervall festzulegen oder an externe Trigger-Events zu binden. Um einen größeren Datenverlust bei Aufzeichnungsstörungen vorzubeugen werden die einströmenden Daten in kurzen Zeitabschnitten als vollständige Chunks archiviert.

Jede Serverinstanz protokolliert die Sensordaten sowie Metadaten lokal im (ggf. verlustfrei komprimierten) Rohdatenformat um Wiederholungen der aufgezeichneten Experimente über die gleiche Ausführungs- und Auswertungsverarbeitung zu verknüpfen. Grundlegend werden zu jeder Datenerhebung die Orts- sowie Zeitangaben des jeweiligen Sensorsystemknotens sowie der einzelnen Sensoren protokolliert. Die Ortsinformationen stehen über einen GPS-Sensor am jeweiligen Sensorknoten zur Verfügung und können für jeden einzelnen Sensor in dessen Sensorkonfigurationsmaske im Admin-Client hinzugefügt werden, diese werden auch für eine Zuordnung der Sensorpositionen und Erfassungsbereiche (FOV) auf der zweidimensionalen Belegungskarte benötigt. Metadaten wie Zeitstempel, Protokollierungskategorien oder Abfragesequenzen werden in der Originaldatei gespeichert. Oder können als separate Metadaten gespeichert werden, z. B. bei der Verwendung von optischen Sensoren, die an bestimmte vorhandene Videokomprimierungsbibliotheken gebunden sind welche oftmals keine native Unterstützung für Metadaten bieten. Abbildung 5.16 zeigt eine generische Archivierungs-Abfrage-Grafik für einen Sensor, bei der zwei verschiedene Aufnahmeabfragen an denselben Videosensor adressiert sind. In diesem Beispiel für

```

<serverinstance xsi:schemaLocation="" xmlns:xsi="http://www.w3.org/2001/XMLSchema-instance">
  <name>Sensorbox 1 (Kaimauer)</name>
  <ethernetAddr>192.168.1.2</ethernetAddr>
  <sensors>
    <id>BaslerCamera_80823122</id>
    <type>BaslerCamera</type>
    <displayName>Basler</displayName>
    <options>
      <item key="serialNumber" value="21448378"/>
    </options>
    <position xsi:type="absolutePosition">
      <longitude>8.57502356171608</longitude>
      <latitude>53.534977778420775</latitude>
      <altitude>0.0</altitude>
      <orientation>4.0</orientation>
    </position>
  </sensors>
  <sensors>
    <id>LMS1xx_1232438181</id>
    <type>LMS1xx</type>
    <displayName>LMS 151</displayName>
    <options>
      <item key="ethernetAddr" value="192.168.1.10"/>
    </options>
  </sensors>
</serverinstance>

```

```

<playbackscene>
  <name>Playback Bremerhaven 18.06.2014</name>
  <serverInstance>Kaimauer/serverInstance.xml</serverInstance>
  <serverInstance>AWI/serverInstance.xml</serverInstance>
  <map>
    <name>Hafenübersicht</name>
    <imageFile>map_port2.png</imageFile>
    <topPosition>53.53857731090026</topPosition>
    <bottomPosition>53.531690727191325</bottomPosition>
    <leftPosition>8.566209493965175</leftPosition>
    <rightPosition>8.58680885919955</rightPosition>
  </map>
  <view>
    <startTime>1.403087045560109E9</startTime>
    <endTime>1.4030900429548247E9</endTime>
    <constraints>
      <item key="Map" value="cell 0 0 2 2"/>
      <item key="LMS1xx_1232438181" value="disable"/>
      <item key="LMS1xx_2039536063" value="disable"/>
      <item key="BaslerCamera_80823122" value="cell 2 0 1 2"/>
      <item key="BaslerCamera_790104739" value="cell 0 2 4 1"/>
      <item key="IntegratedCamera_808930381" value="cell 3 0 1 1"/>
      <item key="OptrisCamera_1405033410" value="cell 3 1 1 1"/>
    </constraints>
  </view>
</playbackscene>

```

Abbildung 5.17: Beispiel von Metadaten einer Testfeld-Serverinstanz (links), diese werden jeweils für einen Einsatz bzw. Beobachtungs-szenario angelegt. Konfiguration einer Testfeldszene (rechts), definieren Karten, Links zu Instanzen und Darstellungseigenschaften für Wiederholungen oder Simulation von sensorbasierten Experimenten

eine IR-Kamera deren zur Verfügung gestellte Temperaturmatrix-Information als 32-bit-RGBA-Bild uminterpretiert wird. Jede PQL-Archivierungsabfrage wird in zwei Odysseus-Operatoren übersetzt, einen Mapping-Operator der eine Bild-Neuinterpretation durchführt sowie einen Send-Operator der die komprimierte Videodatei protokolliert. Bei der Verwendung von Odysseus Query Sharing teilen sich mehrere PQL-Archivierungsabfragen das uminterpretierte Bild, so dass der Mappingprozess nur einmal ausgeführt wird und Systemressourcen geschont werden.

Die Rückverfolgbarkeit der Daten wird durch eine einmalige Vergabe des Dateinamens unterstützt, sowie durch die Verknüpfung von lokaler Netzwerk- Serverinstanz-Aufzeichnungskonfiguration und den jeweiligen archivierten Roh- und Metadaten gewährleistet. Diese erfolgt dabei über eine Szenen- Konfigurationsdatei im xml-Schema welche für jedes Szenario angelegt wird, dargestellt in Abbildung 5.17, links. Multiple Serverinstanzen können in einer Szene zusammengeführt werden. Eine Szene beinhaltet dabei links zu den Daten der Server-Instanzen und definiert weiterhin Darstellungseigenschaften für die Admin-Client Anwendung (frei definierbare Videostream-Kacheln, Lidar-Datenfenster, zweidimensionale Belegungskarte, ...). Die Szenenkonfiguration kann sowohl für Replay-Module verwendet werden als auch für Live-Testfeldanwendungen wiederverwendet werden. Da darin sowohl Ortsangaben der Szene und Sensor-FOV definiert sind, wird eine Reproduzierbarkeit von realen Szenarien ermöglicht

5.3.8 Replay-Modul

Nachdem ein Experiment durchgeführt wurde, können aufgezeichnete Sensordaten oder komplette Szenen mit der gleichen integrierten Übersicht mittels der Admin-Client Anwendung wiedergegeben und visualisiert werden, wie sie auch für die Live-Datenvisualisierung verwendet wird. Um eine vollständige Wiederholung von Sensorexperimenten zu ermöglichen, können Sensoraufnahmen von mehreren Serverinstanzen in Szenen akkumuliert aufgerufen werden. Diese sind entweder über die zuvor bei der Aufzeichnung erstellten Szenen-Konfigurationsdatei definiert oder werden bei Bedarf je nach Anforderung aus beliebigen Aufnahmeinstanzen erneut zusammengestellt, dargestellt in Abbildung 5.17, rechts. Die xml-definierten Szenen werden über die JAX-Webservice-Schnittstelle in einer Odysseus Management-Server-Instanz eingelesen und daraus ein Replay- Sensorknoten mit den aufgezeichneten Daten erstellt. Das in den Admin-Client integrierte Szenenmanagement unterstützt hierfür eine flexible Ansichtskonfiguration für jeden Sensor und bietet Übersichtskarten zur Visualisierung von mehreren Sensoren. Aufgenommene Sensordaten können in Wiedergabeszenen dargestellt werden und in Abschnittsschleifen des kompletten, unter Umständen lange andauernden, Experiments ausgeführt werden. Diese Abschnitte werden durch Zeitmarkierungen in der jeweiligen Szene definiert, dargestellt in der unteren Event- log Zeitleiste in Abbildung 5.14.

5.3.9 Simulations-Modul

Die Auslegung der Systemarchitektur stellt gleichzeitig den bilateralen Datenaustausch zwischen realen Sensorknoten / simulierten Knoten beziehungsweise der realen Welt / simulierten Welt dar. Zusätzlich können Replay-Sensorknoten gleichzeitig mit Simulationen und realen Sensorknoten verwendet werden. Ein Simulations-Modul wird im Allgemeinen im Testfeldsystem dadurch gekennzeichnet, dass dieses entweder auf eine bestehende Datenbasis aus realen Szenarien zurückgreift (identisch wie ein Replay-Sensorknoten) oder weitere Datenquellen aus einer anderen Datenquelle hinzufügen kann. Weiterhin auch dadurch das Daten über das Simulations-Modul an andere Anwendungen bereitgestellt werden können, ein bilateraler Austausch stattfindet.

Als einfache Simulation werden aufgezeichnete Daten, wie beim Replay- Sensorknoten, über die eingerichtete JAX-Webservice-Schnittstelle in einer

Odysseus Management-Server-Instanz erstellt. Hierbei werden die im Replay- Sensorknoten wiedergegebenen Sensordaten verwendet um eine Live- Datenverarbeitung im DSMS-Framework intern zu simulieren, dies ist standardmäßig über die Admin-Client Anwendung eingerichtet und ohne weitere DSMS-Zusatzmodule verfügbar.

Allgemeine und komplexere Simulationen können darüber hinaus entweder auf dem Testfeld-Client (Admin-Client Applikation) oder in einer anderen Simulationsumgebung durchgeführt werden. Dazu können die zu simulierenden Datenquellen und Datensinken nach Anwendungserfordernisse definiert werden. Für die Integration von externen Quellen bietet das DSMS Odysseus hierfür ein modulares und erweiterbares Adapter-Framework an. Jeder Sensortyp im Testfeld- Datenstrommanagementsystem wird, wie eingangs beschrieben, durch einen *Transport-Protokoll-Daten-Handler* als Datenquelle und Datensenke gekennzeichnet. Dieser ist verantwortlich für die Kommunikation zwischen dem Odysseus DSMS- Framework und anderen Daten-Lieferanten oder -Verbrauchern. Eine Schnittstelle zu anderen Simulationsumgebungen wird durch die gerichtete Verknüpfung in dem unterschiedliche Ebenen der Verarbeitung (Transportschicht z. B. TCP, File, MessageBus, Protokollschicht z. B. CSV, JSON, ByteBuffer) ermöglicht. Diese TPD-Handler können jeweils voneinander getrennt angewendet werden und durch deren Kombination ein passender *Client- Transporthandler* (Wrapper) geformt werden. Hierbei werden die Sensordaten beispielsweise über Ethernet an einen beliebigen Host bereitgestellt. Diese *Client- Transporthandler* können nur in einer Richtung verwendet werden, um Daten zu veröffentlichen.

Ebenso können andere Simulationsumgebungen Verbindungen zu einem oder mehreren Odysseus Sensor Management Servern herstellen und deren simulierte Sensordaten und Objekte an das DSMS-Framework bereitstellen. Hierfür stehen *Server- Transporthandler* mit unterschiedlichen Übertragungsprotokollen und unterstützten Datentypen zur Verfügung, die an dieser Stelle aufgrund deren Vielfältigkeit nicht im Einzelnen aufgeführt werden können. Beliebig neue Client- oder Server-Transporthandler können weiterhin nach Bedarf zusätzlich erstellt werden und als OSGi-Bundles bereitgestellt werden.

Für Livedaten, Datenaufzeichnungen und Simulationsdaten besteht somit die Möglichkeit diese parallel einzulesen und zu verarbeiten oder für andere Systeme bereitzustellen.

5.3.10 Zusammenfassung DSMS Integration

In diesem Kapitel wurde gezeigt wie die entwickelte Testfeldarchitektur aus dem Kapitel 4.1 in ein Datenstrommanagementframework erfolgreich implementiert wurde. Ausgehend von den Anwendungen und der Testfeldarbeitsweise in realen Studienumgebungen sowie den Anforderungen aus anderen wissenschaftlichen Anwendungsbereichen wurde eine verteilte Prozessierung und enge Verknüpfung von Szenen-Wiederholungen sowie Simulationen berücksichtigt.

Beginnend mit einer Einführung in die Arbeitsweise und Architektur vom Odysseus DSMS-Framework, wurde anschließend auf die Tupel-Zeitstruktur einer Datenstromverarbeitung sowie die verteilte Verarbeitung von DSMS-Instanzen im Netzwerkzusammenschluss eingegangen. Nachfolgend wurde die Verarbeitung im DSMS von verteilten (optischen) Sensordaten hin zu einem globalen Weltmodell anhand eines JDL-Datenfusionsmodells präsentiert, welches ein situatives Umweltlagebild der maritimen Studiengebiete für mehrere Nutzer darstellen kann. Im Anschluss wurde die Implementierung auf Server- und Client-Seite vorgestellt und eine Admin-Client-Applikation präsentiert, welche nützliche Funktionen inklusive eines HMI-Interface für den Testfeldbetrieb bereitstellt. Des Weiteren wurde das Management von Metadaten als auch das Datenspeichermanagement sowie deren Bedeutung für einen reproduzierten Testfeldbetrieb vorgestellt. Zum Schluss wurde die Implementierung von einem Replay-Modul als auch eines Simulationsmoduls und dessen Schnittstellen für andere Simulationsumgebungen aufgezeigt.

In den nachfolgenden Kapitel 6 sowie Kapitel 7 kann das Testfeldsystem nach der erfolgten Implementierung in realen Studienanwendungen eingesetzt werden und die angedachten Aufgaben für die 1) Onlineerkennung relevanter Situationen, 2) Sammlung von Daten für die weitere Analyse und 3) Wiederverwendung dieser Daten, anhand von Szenarien / Fallstudien evaluiert werden.

Folgende Übersicht stellt die wichtigsten Funktionalitäten und deren Umsetzung im DSMS-Framework kurz zusammen, welche durch die Sensor-Management-Bundles sowie der Admin-Client Applikation, gepaart mit den bestehenden Funktionalitäten des Odysseus DSMS-Frameworks ermöglicht werden:

a) Handling optische Sensoren / Videosensoren

Speziell optische Sensoren die Videostreams oder Bilder generieren können mit TPD-Handler an unterschiedliche VideoStream-Bundle übergeben werden. Hierfür bieten eine FFmpeg Bibliothek sowie eine OpenCV Bibliothek die Unterstützung für unterschiedlichste Videoquellen mit über 300 verschiedenen Codecs.

b) Unterstützung und Erweiterbarkeit für verschiedene Datentypen

Durch das Laden von OSGi-Bundles können neue Datenquellen, Datentypen und Java-Klassen einem laufenden Server hinzugefügt werden. Weitere Client- als auch Server-TPD-Händler können zusätzlich bei Bedarf neu angelegt werden und somit das System erweitert werden.

c) Verteilte Prozessierung, in dynamischen Umgebungen einsetzbar

Eine verteilte Datenstromverarbeitung unter der Verwendung eines Netzwerkes von miteinander verbundenen Odysseus-Instanzen (Sensorsystemknoten) wird durch das DSMS-Framework mit der Erweiterung „OdysseusNet“ zur Verfügung gestellt. Standardmäßig werden dadurch alle Quellen im Netzwerk automatisch ohne weitere Interaktionen verteilt. Dies bietet die Möglichkeit in dynamischen Umgebungen Sensorsystemknoten an unterschiedlichen geographischen Positionen sowohl mobil als auch stationär einzusetzen und über die dynamische Netzwerktopologie deren lokalen Weltmodelle in das globale Weltmodell einzubinden bzw. zu fusionieren.

d) Adaptive und flexible Konfiguration von Sensoren zur Laufzeit

Eine adaptive flexible Sensorkonfiguration steht mittels einer JAX-WS-Schnittstelle zur Verfügung. Damit stehen Methoden zum Hinzufügen, Konfigurieren und Entfernen von Sensoren während der Laufzeit des Systems und weiterhin zum Starten und Stoppen einer Testfeldszenen-Protokollierung bereit. Weiterhin bietet das DSMS-Framework mit verschiedenen OSGi-Bundles die Möglichkeit alle vernetzte Sensorsystemknoten auf Server- und Clientseite auf einem neuen Revisionsstand zu aktualisieren, ohne der Notwendigkeit physisch vor Ort in das Testfeldsystem einzugreifen.

e) Datenarchivierung

Ein einheitlicher Sensordatenspeicheransatz mit Metadateninformationen wurde implementiert und bietet die Archivierung kompletter Experimente und Szenen in .xml-definierten Strukturen. Daten können anhand ihrer Benennung sowie der

einzelnen Metadaten, als auch der Metadaten der Experiment-Szene im System sowie auch aus der tatsächlichen Umweltsituation dokumentiert und somit zum Ort- und im Zeitkontext zurückverfolgt werden.

f) Informationsqualitätsbearbeitung

Das Odysseus DSMS-Framework implementiert die Informationsqualität und die Wahrscheinlichkeitsverarbeitung anhand des in (Kuka und Nicklas 2014) dargestellten Konzepts. Eine formulierte Anfrage an einen Datenstrom wird dabei durch zusätzliche Quellen erweitert und verwendet um aktuelle Qualitäten von einzelnen Sensorwahrnehmungen kontinuierlich zu bestimmen sowie mit der ursprünglichen Verarbeitungsanfrage zu verknüpfen.

g) Validierung der Datenverwaltung

Spezifische Abfragesprachen wie CQL oder PQL mit einer formal definierten begrenzten Algebra werden im DSMS-Framework Odysseus verwendet. Damit stehen Sensordatenverarbeitungsgraphen zur Verfügung, welche wiederkehrend verwendet werden können und die Möglichkeit zur Validierung der Datenverwaltung im DSMS bieten.

h) Reproduzierbarkeit von Experimenten

Ein einheitlicher Sensordatenspeicheransatz mit Metadateninformationen ermöglicht die Verwendung einer zentralisierten Auswertung, Wiedergabe und Nachbearbeitung. Wie auch bei der Validierung der Datenverwaltung aufgeführt, besteht die Möglichkeit Sensordatenverarbeitungsgraphen wiederkehrend zu verwenden. Weiterhin stehen Metadaten zu den Sensoren, Sichtbereichen und Szeneninstanzen zur Verfügung um reale Experimente reproduzierbar durchführen zu können.

i) Verknüpfung von Simulation

Die Implementierung des Simulations-Moduls wird durch die clientseitige Software „Admin-Client Applikation“ ermöglicht. Da diese Applikation mit der DSMS-Server-Software gekoppelt ist, stehen hierfür sowohl Client- und Server Transporthandler für den bidirektionalen Datenaustausch zur Verfügung. Livedaten, Daten aus Aufzeichnungen und Simulationsdaten können damit gleichzeitig in DSMS-Framework sowie auf anderen Simulationsinstanzen verarbeitet werden.

5.4 Testfeldsystem Leistungscharakteristik

Ausgehend von der zuvor aufgezeigten Integration des Testfeldsystems werden in diesem Kapitel grundlegende Leistungsmerkmale zur Latenz und Datendurchsatz im Bezug zur hochvolumigen Videodatenstromverarbeitung und Informationsverteilung betrachtet und anhand einer Leistungsdatenerhebung für unterschiedliche Systemzustände aufgezeigt. Der Zusammenhang zwischen Systemressourcen und praktischer Anwendbarkeit zeigt die Performance und im weiteren Limitierungen des Testfeldsystems auf. Hierzu wird die Gesamtsystemcharakteristik auf Grundlage des in Kapitel 5.3.3 eingeführten Datenfusionsmodells für EO Sensoren herangezogen.

5.4.1 Übersicht Leistungsmerkmale und Leistungsdatenerhebung

Die Performance vom Testfeldsystem wird nicht nur von der Software selbst beeinflusst, sondern auch von allen darunterliegenden Ebenen wie dem Betriebssystem, der Middleware, der Hardware und des Kommunikationsnetzwerkes. Um am Ende eines Softwareentwicklungsprozesses leistungsrelevante Eigenschaften wie z. B. Laufzeitprofile, Ausführungsablaufprofile, Antwortzeiten und operative Zuverlässigkeit bzw. Grenzen zu beurteilen, werden dynamische und statische Testmethoden herangezogen (Dietrich 2008). Das Performance Monitoring gehört der Kategorie der dynamischen Testmethoden an mit dem u. a. funktionale Anforderungen eines Testobjekts während der Ausführung getestet werden.

Die Systemressourcen des Testfeldes zur Datenstromverarbeitung sowie Datenkommunikation werden durch unterschiedliche Systemkomponenten wie Sensorschnittstellen, Arbeitsspeicher, CPU, Speichermedien oder beispielsweise Netzwerkkomponenten bereitgestellt. Wie in Abbildung 5.12 anhand des JDL- Datenfusionsmodells aufgezeigt, können hierbei Datenquellen und Senken verteilt auf unterschiedlichen Sensorsystemen im Netzwerkverbund vorliegen.

Abbildung 5.18 verdeutlicht an diese Stelle zusammenfassend die einzelnen Ebenen des Testfeldgesamtsystems von der Sensorquelle über die Datenstromverarbeitung mit Multimediabibliothek hin über einen Netzwerkverbund. Dedizierte funktionale Leistungsmerkmale im Bezug zur Videodatenstromverarbeitung stellen Daten-

- *Latenz*: Metrik für die benötigte Dauer einer Datenstromerarbeitung von der Sensorquelle bis zur Informationssenke, sowie
- *Durchsatz*: Metrik für die verarbeitende Nettodatenmenge pro Zeit dar.

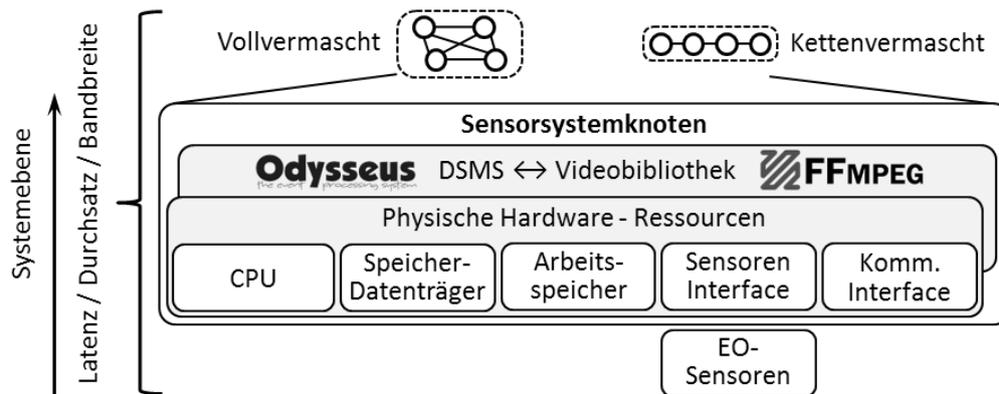


Abbildung 5.18: Übersicht von Sensorsystemressourcen für eine Datenstromverarbeitung und -übertragung von EO-Sensorinformationen im Testfeld. In der unteren Ebene EO-Sensoren als Datenquellen sowie verfügbare physische Ressourcen wie (Multi-) CPU, Speicher, I/O-Interface. Darüber liegend eine Datenverarbeitung mit einem Datenstrommanagementsystem und einer Multimediaprogrammbibliothek (FFmpeg). In der oberen Ebene die Datenübertragung zwischen mehreren Sensorsystemknoten in vollvermaschter oder kettenvermaschter Netzwerktopologie. Latenz, Durchsatz sowie Bandbreite sind in den einzelnen Ebenen des Testfeldsystems zu berücksichtigen

Ausgehend von der untersten Ebene, der Sensorebene und den folgenden Systemebenen sollen zunächst die Latenz sowie der Datendurchsatz von Videodatenströmen im Bezug zu den zur Verfügung stehenden Testfeldsystemressourcen von (Video-) Datenstromverarbeitungsschritten mittels Performance Monitoring betrachtet werden. Dies ist insbesondere von Interesse da in dieser Arbeit strukturell neue Features durch die Multimediabibliothek für die hochvolumige live Videodatenstrombearbeitung, wie beispielsweise Videocodierung sowie Videodatencontainer, in dem Testfeldsystem-DSMS implementiert wurden.

Einen generischen Testfall für Latenz und Datendurchsatz stellen zwei vernetzte Sensorsysteme dar welche Client- sowie Server-funktionen über das DSMS und autonomen 5 GHz WLAN bereitstellen. Als Live-Videodatenquellen wurden die in Kapitel 5.1 beschriebenen EO-Sensoren VIS-Kamera und IR-Kamera eingesetzt, welche jeweils unterschiedliche Anforderungen an das Testfeldsystem aufgrund deren Sensorschnittstellen, Middleware, RAW-Videodatenströmen sowie dem DSMS Access Framework und Attribute Mapping stellen. Die Datenerhebung für dedizierte Systemleistungsparameter der Prozessorauslastung, Arbeitsspeicher, Datenträgerschreibdurchsatz, sowie Videodatenstrombandbreite im Netzwerk wurde mittels Windows Performance Monitor (Microsoft TechNet 2017) mit einer

Datenerfassungsrate von 1 Hz umgesetzt. Mithilfe des Windows Performance Monitor Tools können auf einem System ausgeführte Programme sowie die Leistung des Computers durch Monitoring von Leistungsindikatoren zu Datensammlungssätzen kombiniert und Protokolldaten, Ereignisüberwachungsdaten und Konfigurationsinformationen für eine Analyse verwendet werden. Dies ermöglicht sowohl die Middleware (beispielsweise für die Interprozesskommunikation der IR- Kamera) als auch die DSMS-Instanz unabhängig voneinander zu betrachten. Für die Berechnung der Latenz in den jeweiligen Testfeldsystemebenen (Abbildung 5.18) wurden sowohl absolute Datenzeitstempel für einzelne Videoframes (Metadaten) durch das DSMS im Testfeldsystem als auch relative Datenzeitstempel durch eine testfeldexterne Live- Videoaufzeichnung (30 fps) erhoben. Mindestens 16 Stichproben von aufeinanderfolgenden Videoframes bilden hierbei in den unterschiedlichen Systemzuständen einen Latenzmittelwert. Die vom dem Testfeldsystem losgelöste, externe Datenerhebung bietet analog zu der Leistungsdatenerhebung die Möglichkeit die vorliegende Latenz in den unterschiedlichen Systemebenen als “Blackbox“ vom Sensor über Middleware, DSMS und Netzwerk zu untersuchen ohne dabei Ressourcen eines Sensorsystemrechners, bzw. DSMS bei der Datenerhebung zu beeinflussen.

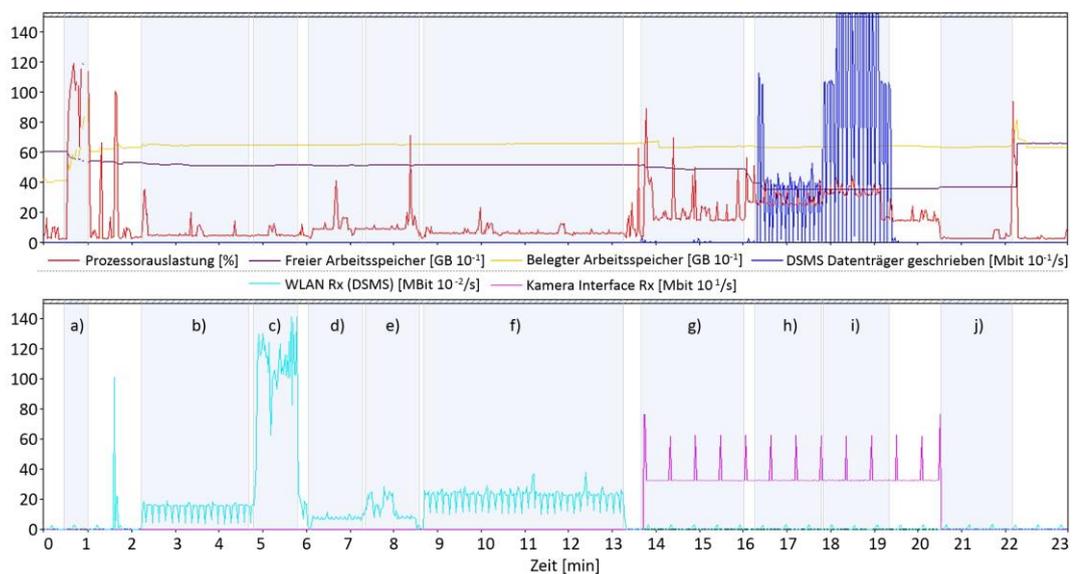


Abbildung 5.19: Monitoring von repräsentativen Systemleistungsindikatoren von physischen Ressourcen einer vernetzten Testfeldinstanz (oben) aufgezeigt für unterschiedliche Systemzustände a) - j). Zugehörige Datenübertragungsraten von Videodatenströmen mittels Testfeldsystemeigenen autonomen WLAN (unten)

Die Ergebnisse des Performance-Monitorings sind in Abbildung 5.19 für relevante Systemleistungsindikatoren dargestellt und in den einzelnen Systemzuständen a) - j) für eine vernetzte DSMS-Instanz (Sensorsysteme) zu interpretieren. Die jeweiligen gekennzeichneten Bereiche sind folgenden Systemzuständen zuzuordnen:

- a) Start DSMS-Programm (Systemleerlauf davor) und nachfolgend die Einbindung und Initiierung von vernetzten sowie lokalen Sensorressourcen im DSMS (eine VIS- und IR- Kamera dezentral von einem vernetzten Sensorsystem sowie einer VIS-Kamera lokal).
- b) Empfang live Videodatenstrom (H.264 / MPEG-4 Videocodec) aus vernetzten DSMS bereitgestellt. Statische Szene (ohne signifikante Bewegungen in dem erfassten Bildbereich) einer dezentralen visuellen Kamera (2048 × 2048 Pixel, 8 bit bei 25 fps). Decodierung zu MP4 Container über FFmpeg Multimediabibliothek sowie Darstellung mittels Admin Client Anwendung.
- c) Live Videodatenstrom einer dynamischen Szene (mit signifikanten Änderungen / Bewegungen in dem erfassten Bildbereich). Identische Konfiguration wie in Bereich b). Nachfolgend Beendung Videodatenstrom.
- d) Empfang live Videodatenstrom (H.264 / MPEG-4 Videocodec) aus vernetzten DSMS bereitgestellt. Statische Szene einer dezentralen IR Kamera (382 × 288 Pixel bei 20 fps). Decodierung zu MP4 über FFmpeg Multimediabibliothek sowie Darstellung mittels Admin Client Anwendung.
- e) Videodatenstrom, dynamische Szene, Konfiguration wie in Bereich d).
- f) Videodatenströme von VIS und IR-Kamera, statische Szenen kombiniert. Identische Konfiguration wie in Bereich b) & d).
- g) Videodatenstrom (RAW Daten) über GigE Vision Interface einer lokalen visuellen Kamera (2048 × 2048 Pixel, 8 bit bei 10 fps). Codierung zu H.264 und Decodierung zu MP4 Container über FFmpeg Multimediabibliothek sowie Darstellung mittels Admin Client Anwendung.
- h) Datenstromaufzeichnung mittels DSMS (MP4 Container) einer statischen Bildszene. Identische Konfiguration wie in Bereich g).
- i) Datenstromaufzeichnung einer dynamischen Bildszene. Identische Konfiguration von Bereich h). Nachfolgend Beendung von Datenaufzeichnung.
- j) DSMS in Leerlauf ohne Videodatenstromverarbeitung. Nachfolgend Beendung und Schließen des Testfeld-DSMS-Programms.

5.4.2 Latenz

EO-Sensoren und physische Schnittstellen

Auf Ebene der EO-Sensoren als Datenquellen wird die Latenz durch die Sensorauslesezeit für einen kompletten Frame sowie der Übertragungszeit an die physische Schnittstelle bestimmt. Diese Zeiten sind u. a. abhängig vom Sensortyp, (z. B. Pixelanzahl), der Kabellänge, dem Übertragungsprotokoll (z. B. durch overhead von IP-Header) sowie Schnittstellentreiber. Als Beispiel soll hier das leistungsfähige GigE Vision Interface mit einer hochauflösenden VIS-Kamera betrachtet werden, welches auf dem GigE Vision Streaming Protokoll (GVSP) basiert und mittels User Datagram Protocol (UDP) über Ethernet übertragen wird. Eine VIS-Kamera stellt, nachdem mehrere Pixel ausgelesen wurden, ein abgeschlossenes GVSP-IP-Paket zusammen (z. B. 9000 Bytes) und überträgt dies umgehend über Ethernet. Die Größe des IP Datenpakets nimmt dabei durch Headerinformationen für die Übertragung zu (36 Byte für IP- & UDP- & GVSP- Header) (Basler AG 2008). In diesem Beispiel beträgt die Auslesezeit vom Kamerasensor (2048×2048 Pixel, 1 Byte / Pixel) 35.4 ms, wobei ca. 33.5 ms für die Bildübertragung über Gigabit Ethernet eines kompletten Videoframes benötigt werden (1 tick / Byte, 1 tick = 0.008 μ s). Insgesamt stellt sich somit in der Ebene der EO-Sensoren eine Latenz von etwa 69 ms ein.

DSMS / Multimediabibliothek

Eine Weiterverarbeitung der empfangenen GVSP-Datenpakete über das DSMS erzeugt weitere Latenz(en), welche durch die Vorverarbeitung, der Merkmalsextraktion und anschließenden Decodierung bzw. Encodierung sowie Pufferung vom H.264 / MPEG-4 Videodatenstrom über die FFmpeg Multimediabibliothek hervorgerufen werden. Die einzelnen Prozessschritte und auftretenden Latenz(en) können anhand eines Beispiels mit einer hochauflösenden VIS-Kamera und vernetzten Server- / Client-DSMS-Instanzen verdeutlicht werden. Der gesamte Prozess der Informationsverarbeitung vom Datenempfang bis zur Darstellung benötigt auf einem lokalen (Server-) DSMS hierbei 460 ms und erhöht sich um 50 ms im Falle einer Datenaufzeichnung (+10 % CPU-Auslastung), ersichtlich im zugehörigen Systemzustand Abschnitt g) bzw. h) - i) in Abbildung 5.19, oben. Auf Seite des (Client-) DSMS bzw. vernetzten Sensorsystems im Testfeld wird der identische H.264 Videodatenstrom hingegen mit einer Latenz von 360 ms, somit 100 ms schneller dargestellt und verhält sich unabhängig bei einer Datenaufzeichnung

auf dem (Server-) DSMS. Um diese Latenzwerte interpretieren zu können müssen die einzelnen Prozessschritte der Videodatenstrombearbeitung und Datenfusion im Detail auf Seite des DSMS-Servers und vernetzten DSMS-Clients betrachtet werden. Wie im JDL-Datenfusionsmodell in Kapitel 5.3.3 aufgezeigt, werden auf Seite des DSMS-Servers zuerst mehrere GVSP-Datenpakete für einen kompletten Videoframe in einen logischen Tupel (Videoframe) über das Access-Framework überführt, mit Metadaten annotiert und nachfolgend Merkmale herausgearbeitet. In diesem Beispiel durch resampling der Rohdatenbildgröße von 4k-Pixel auf 300×300 Pixel (< 40 ms) um eine effektive Datenübertragung über das Netzwerk vorzubereiten. Hierzu werden im Batch mehrere Datentupel (Videoframes) über die FFmpeg-Multimediabibliothek softwareseitig nach H.264 / MPEG-4 codiert und vom DSMS als Videodatenstrom über UDP bereitgestellt. H.264 / MPEG-4 ist dabei nicht an ein bestimmtes Containerformat gebunden und als Kompressionsformat für Audio- und Videodaten standardisiert (ITU-T 2016). Grundlegend findet dabei eine Bewegungskompensation durch eine Zwischenberechnung von Bewegungsvektoren über mehrere Videoframes in einer festgelegten Codier- / Darstellungsreihenfolge innerhalb einer Bildgruppe statt (Group Of Pictures, GOP), beispielhaft dargestellt in Abbildung 5.20. Beginnend und endend mit einem I-Frame als Einzelbild, welches intraframe-komprimiert ist (sehr geringer Informationsverlust) und unabhängig von vorhergegangenen und nachfolgenden Bildern im Videodatenstrom behandelt wird. In B-Frames, sowie P-Frames werden nur Änderungen in der Bildinformation (Vektoren) übertragen, also auch nur Differenzbildinformationen verarbeitet, welche sich zwischen den einzelnen Frames verändern. Für ausführliche Betrachtungen wird an dieser Stelle auf (Richardson 2010) hingewiesen.



Abbildung 5.20: Bildgruppe (Group of Pictures, GOP) für eine H.264 / MPEG-4 Komprimierung eines Videodatenstroms, Beispiel für: Intra-Coded Picture (I-Frame), Bidirectionally Predictive-Coded Picture (B-Frame, zwischenberechnet und stark komprimiert), Predictive-Coded Picture (P-Frame gering komprimiert). Datenstromdarstellungs- / Übertragungsreihenfolge, erfordern jeweils einen virtuellen Puffer bei der Codierung sowie Encodierung des Videodatenstromes

Die Codierung (nach Datenstrom-Ordnungsreihenfolge) und Encodierung (nach Datenstrom-Darstellungsreihenfolge) eines H.264 / MPEG-4 Videodatenstromes benötigt somit jeweils einen virtuellen Puffer (VBV-Puffergröße) für die Batch- Zwischenbildbearbeitung und stellt einen Kompromiss zwischen der Komprimierungsrate für eine bandbreiteneffiziente Übertragung im Netzwerk des Testfeldsystems und Vorbeugung von Problemen durch Paketverlust sowie der CPU- Auslastung und der Latenz dar. Typischerweise wird alle 250 Frames ein I- Frame eingefügt welcher als „Start“-Frame für die Encodierung verwendet wird, sodass möglicherweise bis zu 250 Frames durchlaufen werden müssen bevor der Datenstrom im DSMS abschließend encodiert bzw. dann abschließend dargestellt werden kann. Dies wirkt sich nicht auf die tatsächliche Latenzzeit aus, sondern nur auf die erstmalige Verbindungszeit und trifft gleichermaßen auf Seite des DSMS-Clients als auch eines DSMS-Servers zu. Die Verarbeitungsschritte Merkmalsextraktion & Datenstrom -codierung sowie -encodierung auf Seite eines DSMS-Servers gehen mit einer erhöhten CPU-Auslastung (+10 %) einher, ersichtlich im zugehörigen Systemzustand Abschnitt g) in Abbildung 5.19, oben. Hierbei stellt sich eine Latenz von 460 ms (in dem aufgezeigten Beispiel für eine hochauflösende VIS-Kamera von etwa drei Frames) ein, wobei etwa 69 ms für Sensorauslesezeit und Übertragungszeit über das Kamerainterface inbegriffen sind. Die maximale Latenz für einen IR- Videodatenstrom beträgt ca. 160 ms von der Datenaufnahme über die Middleware- Interprozesskommunikation, und serverseitigen DSMS-Verarbeitung (Temperaturmatrix) und Codierung sowie Übertragung im Netzwerk und der Encodierung und Darstellung seitens eines Testfeld-Clients.

5.4.3 Datendurchsatz

EO-Sensoren und physische Schnittstellen

Im Bezug zum Datenstromdurchsatz auf Ebene der EO-Sensoren eines Sensorsystems zeigt das Performance Monitoring einen schwach periodischen, jedoch streng gleichmäßigen Roh-Videodatenstrom mit konstanter Datenmenge (Steinmetz 2000), ersichtlich im Abschnitt g) - i) (Kamera Interface Rx) in Abbildung 5.19, unten. Hierbei werden im Beispiel von hochauflösenden VIS-Kameras 335 Mbit/s bei 10 fps, bzw. 837 Mbit/s bei 25 fps ohne weitere Einschränkungen über eine, dem jeweiligen EO-Sensor zugeordnete, Ethernetschnittstelle (bis 1000 Mbit/s) empfangen. Seitens der in dieser Arbeit behandelten IR-Kamera werden 35 Mbit/s Rohdatenstrom über

USB 2.0 Interface (bis 480 Mbit/s) empfangen und weiterverarbeitet. Der IR-Videodatenstrom wird dabei nicht direkt von der Kamera erzeugt, sondern über Middleware und Interprozesskommunikation in Form einer Temperaturwertematrix an das Access-Framework des DSMS übergeben.

DSMS / Multimediabibliothek

Das DSMS und die Multimediabibliothek erfüllen im Bezug zu dem Datendurchsatz der EO-Sensoren zwei wesentliche Aufgaben. Erstens eine Datenstromverarbeitung für die Merkmalsextraktion sowie Videokomprimierung zur effizienten Übertragung im Netzwerk und zweitens eine Datenstromverarbeitung zur effizienten, aber zugleich inhaltlich verlustfreien, Speicherung incl. Metadaten.

Im ersteren Aufgabenfall wird der Rohdatenstrom für ein effektives Videostreaming über die DSMS-Multimediabibliothek nach H.264 / MPEG-4 komprimiert. FFmpeg unterstützt (derzeitig) noch nicht eine flexible automatische Anpassung der Codierungsbitrate in Abhängigkeit der Netzwerkperformance, was im Fall von schwankenden Netzwerkbedingungen von Vorteil wäre, aber sowohl die Ausgabe von Videodatenströmen in nach oben gedeckelten bzw. festen Bitraten. Im Testfeldsystem-DSMS ist dabei das Konzept der gedeckelten variablen Bitrate, VBR für minimale-, maximale- und mittlere (Ziel-) Datenrate umgesetzt (Tanwir und Perros 2014) und zeigt im Performance Monitoring ein typisches Verhalten für den transmittierten Datendurchsatz. Durch die H.264 / MPEG-4 Bewegungskompensation besitzen Videoszenen mit nur geringen inhaltlichen Änderungen in einer Bildgruppe auch einen geringeren Ausgangsvideodatenstrom und damit Datendurchsatz. Ersichtlich in Abbildung 5.19, unten (WLAN Rx, DSMS) von Abschnitt b) verglichen zu Abschnitt c) für einen hochauflösenden VIS-Videodatenstrom. Im „Ruhezustand“ einer Videoszene wird hierbei durch Merkmalsextraktion und Videokompression ein Rohdatenstrom von 837 Mbit/s auf durchschnittlich 170 kbit/s verringert und im Netzwerk übertragen. Im Falle einer bewegten Szene stellt sich ein Datendurchsatz von ca. 1.8 Mbit/s für eine hochauflösende VIS-Kamera im Testfeldsystem ein. Dies entspricht einen Kompressionsfaktor von 1:465, bzw. geringeren Datenstromdurchsatz von -99,9 % gegenüber dem Rohdatenstrom und stellt im Bezug zu anderen vergleichenden Anwendungen mit Kompressionsfaktoren bis zu 1:1000 einen Mittelwert dar. Der komprimierte Videodatenstrom einer IR-Kamera ist im Vergleich von Abschnitt d) zu Abschnitt e) in Abbildung 5.19, unten (WLAN Rx, DSMS) zu betrachten. Hierbei wird ein Rohdatenstrom von 35 Mbit/s auf

durchschnittlich 60 kbit/s bei statischen Bildszenen bzw. 240 kbit/s bei bewegten Szenen komprimiert. Der Kompressionsfaktor beträgt in diesem Fall 1:145 bzw. - 99,3 % gegenüber dem Rohdatenstrom. In beiden beschriebenen Videostreaming-Testfällen (für VIS/IR) zeigt sich nur eine geringe (Multi-) CPU- Auslastung während des Encodierens seitens des DSMS-Clients von durchschnittlich 6 %, wobei 2,5 % CPU-Auslastung im Leerlauf des Systems zu berücksichtigen sind, dargestellt in Abschnitt d) - f) in Abbildung 5.19, oben.

Im zweiten Aufgabenfall, der Datenspeicherung, werden Rohdatenströme lokal auf einem Sensorsystem seitens eines DSMS-Servers aufgezeichnet. Im Beispiel von visuellen Kameras erfolgt dies verlustfrei komprimiert (H.264) im MP4-Container über die DSMS-FFmpeg-Multimediatebibliothek. Dabei werden vereinfacht dargestellt nur schwach komprimierte Intra-Coded Pictures, I-Frames dem Ausgangsdatenstrom zugeordnet. Ein verlustfrei komprimierter Datenstrom ist im Beispiel einer VIS-Kamera in Abbildung 5.19, oben dargestellt und zeigt während einer Aufzeichnung auf einen lokalen Datenträger einen Datenstrom von durchschnittlich 3.2 Mbit/s bei statischen Bildszenen bzw. 16.8 Mbit/s bei bewegten Szenen (Rohdatenstrom 335 Mbit/s) bei einer zusätzlichen CPU-Auslastung von +10 %. Der (schwache) Kompressionsfaktor beträgt in diesem Fall 1:19. Für eine Aufzeichnung der Temperaturmatrix einer IR- Kamera wird ein AVI-Container (Audio Video Interleave) verwendet mit dem RAW-Temperaturwerte ohne weitere Komprimierung durch Bewegungskompensation mit H.264 / MPEG-4 bei einer Zwischenbildberechnung gesichert werden. Hierbei stellt sich ein durchschnittlicher Datenstrom von 19.8 Mbit/s (Faktor 1:1.7) ein (nicht dargestellt). Zu beachten ist, dass in diesem Fall der Faktor von Rohdaten zu aufgezeichneten Daten kein Kompressionsfaktor darstellt, sondern ein Verhältnis von Sensor-Rohdatenstrom (Temperaturwertmatrix, 2 Byte / Pixel - 16 bit) zum Videodatenstrom im 32 bit / Pixel- AVI Datencontainer wiedergibt. Im Weiteren zeigt das Performance Monitoring in allen Systemzuständen keine systemrelevante Limitierung im Bezug zu dem verfügbaren physischen, residenten System- Arbeitsspeicher, dargestellt in Abbildung 5.20, oben. Während der Datenaufzeichnung eines hochvolumigen Videodatenstromes wird bis zu 1.3 GB (26 %) zusätzliches Speicherkontingent in Anspruch genommen, welches mittels einer Speicherauslagerungsdatei temporal abgelegt wird, in diesem Beispiel mit einem Solid- State- Systemdatenträger ersichtlich in Abschnitt h) - j).

5.4.4 Bandbreite im Netzwerkverbund

Die Datenübertragung zwischen mehreren Sensorsystemknoten im Testfeld stellt eine physische Limitierung von parallel nutzbaren Livedaten (Datensenken aus dem DSMS) zur Fusionierung und Verteilung einer Lageinformation dar. Grundsätzlich soll an dieser Stelle die zur Verfügung stehende Bandbreite von gegensätzlichen Topologien im vollvermaschten, sowie reihenvermaschten Sensorsystemnetzwerk (Mamun 2012) in einem Testfeld und verfügbare Technologien zur drahtlosen Datenübertragung betrachtet werden. Hierbei ist anzumerken das für eine vollständige Lagebilderstellung, durch die Fusionierung von allen verteilt gesammelten und vorprozessierten Lageinformationen aus der Modellinstanz, ein bidirektionaler Datenaustausch über den Kommunikations-Link erforderlich ist (verweis auf Kapitel 5.3.3 Testfeld Datenfusionsmodell für optische Sensoren). Der Kommunikations-Link bildet damit eine Engstelle für die Datenübertragungsperformanz im gesamten Testfeldsystem. Hierbei stellt ein reihenvermaschter Link die ineffizienteste Netzwerktopologie bezüglich der Ausfallsicherheit dar, wobei sich alle Datenströme der Reihe nach aufsummieren und eine hohe Netzwerkauslastung in jedem Netzwerkknoten verursachen. Bei Ausfall eines Kommunikations-Links würde das gesamte Testfeldsystem somit gestört. Im anderen Betrachtungsfall bietet ein vollvermaschter Link ein ausfallssicheres und selbstheilendes Netzwerk, in dem die Bandbreite einzelner Server-Client-Verbindungen jeweils parallel auf die Gesamtbandbreite aufgeteilt werden. Für beide Netzwerktopologien gilt jedoch gleichermaßen eine maximale verfügbare Bandbreite im Testfeld. In der Konfiguration mit MIMO Technologie (Multiple Input Multiple Output) der implementierten WLAN-Router ist das Kommunikationsnetz auf eine Bandbreite von maximal 600 Mbit/s Rx / Tx (Receiver exchange / Transmitter exchange) ausgelegt, womit bei ca. 166 Videodatenströmen (je 1.8 Mbit/s) die verfügbare Bandbreite ausgelastet wäre. Aufgrund der modularen Architektur des Testfeldsystems können auch andere Technologien wie z. B. Richtfunk oder LTE als Kommunikations-Link eingesetzt werden. Richtfunk-WLAN stellt hierfür etwa 360 Mbit/s Bandbreite Rx / Tx zur Verfügung und ermöglicht in diesem Fall eine gleichzeitige Übertragung von bis zu 200 Videodatenströmen. Für LTE (Mobilfunk 4G) Technologien wird ein asynchrones Rx / Tx-Verhältnis von max. 300 / 50 Mbit/s (abhängig vom Netzausbaugebiet) seitens Drittanbieter zur Verfügung gestellt, was einen bidirektionalen DSMS-Datendurchsatz auf maximal 27 Videodatenströme begrenzt.

5.4.5 Diskussion DSMS Leistungscharakteristik

Zusammenfassend ist auf Basis der Systemleistungsindikatoren des Performance-Monitorings festzustellen, dass hauptsächlich die verfügbare Prozessorleistung eines Sensorsystemrechners seitens der DSMS-Serverfunktionalität als limitierender Faktor für eine kontinuierliche und simultane Datenverarbeitung mit hochauflösenden Videodatenströmen anzusehen ist. Im Allgemeinen gilt, dass eine hohe Videokomprimierungsqualität mit erhöhter CPU-Auslastung einhergeht, dadurch jedoch auch nur eine geringe Bandbreite im Netzwerk für die Videostreamingfunktionalität benötigt wird. Hierfür bietet die H.264 Videocodierung mit gedeckelter variabler Bitrate, VBR einen guten Kompromiss zwischen Systemperformance und Netzwerkperformance. In der implementierten Konfiguration ist ein Betrieb, d. h. die Datenaufnahme und Verarbeitung über das Odysseus-DSMS und der FFmpeg Multimediabibliothek von bis zu vier hochauflösenden Videodatenströmen pro Sensorsystemeinheit ohne Paketverlust und damit ohne Bildstörungen möglich. Bezüglich der Latenz der Datenstromverarbeitung für hochauflösende EO-Sensoren ist festzustellen, dass die Datenübertragung über die physischen Schnittstellen nur einen geringen Anteil von etwa 15 % ausmacht und somit hauptsächlich die lokale Videovorverarbeitung in Form von Bildbearbeitungsschritten zur Merkmalsextraktion, sowie der virtuelle Puffer zur H.264 Codierung zu einer erhöhten Latenz von ca. 360 ms beiträgt. Für die lokale verlustfreie Rohdatenaufzeichnung incl. Metadaten aller physisch verbundenen EO-Sensoren bietet das Testfeldsystem in diesem Zusammenhang eine ausreichende Kapazität hinsichtlich Speicherplatz Arbeitsspeicher und Datendurchsatz. Die Aufzeichnungsleistung eines einzelnen DSMS-Servers ist auf Basis der verfügbaren kontinuierlichen Datenübertragungsrates seitens eines Speichermediums (bspw. Festplatte mit max. 1800 Mbit/s) auf 35 parallele Aufzeichnungsinstanzen von hochauflösenden Videodatenströmen limitiert. In der implementierten Konfiguration des Testfeldsystems zeigt dabei eine Systemskalierung auf Basis der CPU-Systemauslastung einen störungsfreien parallelen Betrieb von bis zu 12 vernetzten Sensorsystemen mit je vier 4k-VIS- und einer IR-Kamera. Die Leistungsbetrachtung verdeutlicht in dem Testfeldgesamtsystem eine ausgewogene Performance zwischen den Funktionalitäten für Videostreaming sowie Videodatenaufzeichnung von DSMS-Servern und DSMS-Clients in Kombination mit neuen Funktionalitäten der FFmpeg Multimediabibliothek sowie der Bandbreitenkapazität im Netzwerk.

5.5 Zusammenfassung Testfeldsystem-Integration

In diesem Kapitel wurde gezeigt, wie die zuvor entwickelte Testfeldarchitektur und die gewünschten Testfeldfunktionalitäten von Sensoren, Hardware und Software erfolgreich in explorative Prototypen umgesetzt wurden. Zu Beginn in Kapitel 5.1 wurde dargestellt welche elektrooptischen Sensoren anhand der aufgestellten Kriterien für die Anwendung der Umweltlagebilderstellung ausgewählt wurden. Vor der erstmaligen Verwendung im Testfeld wurde durch Qualitätssicherungsmaßnahmen in Form von technischen Prüfungen und Berechnungen die gewünschte Abbildungsleistung von visuellen und infraroten Videokameras in Kombination mit den eingesetzten Objektiven sowie von LIDAR-Laserscanner sichergestellt.

Um reale Testfeldszenarien mit verteilten Sensoren durchführen zu können bedarf es weiterhin an physischer Hardware mit funktionellen, flexiblen Eigenschaften sowie einer Netzwerkarchitektur. Hierfür wurden in Kapitel 5.2 Sensorsystemknoten vorgestellt und die Integration von Schnittstellen für Sensoren, Kommunikation zur Vernetzung und Bereitstellung von Daten, einer CPU sowie die grundlegend erforderliche Energieversorgung gezeigt. Sensoren und Hardware bilden zwar die Grundausrüstung im Testfeld, stellen aber für sich erst einmal keine weitere Information zur Verfügung. Hierfür ist eine geeignete Datenverarbeitung erforderlich, welche eine Kernkomponente des Testfeldsystems darstellt.

In Kapitel 5.3 wurde dazu die Integration der Testfeldarchitektur in ein Datenstrommanagementsystem vorgestellt. Zu Beginn wurde auf die Arbeitsweise sowie Architektur des verwendeten DSMS Frameworks Odysseus eingegangen und die Funktionalität der verteilten Verarbeitung im Netzwerkzusammenschluss aufgezeigt. Anhand eines JDL-Datenfusionsmodells wurden darauf folgend Informationsverarbeitungsschritte aus verteilten Testfeldinformationsquellen hin zu einem umfassenden Umweltlagebild beschrieben, welches für mehrere Nutzer umgehend ein situatives Lagebild der Umgebung in stationären sowie mobilen Anwendungen bereitstellen kann. Die Implementation beschreibt weiterhin Server- und Client-Funktionen des DSMS und eine Admin-Client Applikation für den erleichterten Testfeldbetrieb. Abschließend wurde in Kapitel 5.4 die Systemperformance für kritische Leistungsparameter anhand eines vernetzten Testfeldsystems aufgezeigt.

6 Nutzung und Evaluation des Testfeldes für Umweltlagebilderzeugung

Dieses Kapitel adressiert vorab die allgemeine Planung und den Ablauf für einen Testfeldeinsatz. Dem Leser soll verdeutlicht werden wie ein Testfeld für optische Sensoren verwendet werden kann. Und auch welche Punkte beachtet werden sollten um das in dieser Arbeit entwickelte Testfeldsystem für verschiedene Fragestellung erfolgreich einzusetzen.

Im Weiteren werden unterschiedliche Anwendungen durch die Applikation des Testfeldsystems für die Live-Umweltlagebilderzeugung in maritimen Studienumgebungen vorgestellt. Hierbei steht einerseits die Betrachtung und Erprobung der Arbeitsweise und Funktionen des Testfeldsystems zur Evaluierung, als auch die Demonstration der Anwendbarkeit im Kontext für Verkehrs- und Umweltfragestellungen im Vordergrund.

6.1 Planung und Ablauf für einen Testfeldeinsatz

Für eine Applikation des Testfeldes sollte im Vorfeld feststehen welche Fragestellungen betrachtet werden sollen oder sich durch den Einsatz möglicherweise ergeben können. Handelt es sich um die Erprobung einer Anwendung aus dem Verkehrsbereich, Umweltbereich, oder möglicherweise die Kombination von Anwendungen in einem Studiengebiet? Besteht der Bedarf neue Kommunikationstechniken zu testen oder gänzlich neue optische Sensoren erstmalig einzusetzen und diese für eine Anwendungseignung zu erproben? Potenziale bestehen durch die Kombination unterschiedlicher optischer Sensoren in vielen Studienfällen, auch bieten unterschiedliche Positionen und Sichtbereiche der optischen Sensoren möglicherweise Vor- oder Nachteile im Studiengebiet. Um das Testfeld mobil oder stationär einzusetzen sollte auch ein relevanter Betrachtungszeitraum für einen raum- zeitlichen- Kontext in der Studie berücksichtigt werden. Unterschiedliche Nutzergruppen könne u. a. angesprochen werden, wobei die Sensordaten live, also unmittelbar zur Verfügung stehen, oder auch die Datenaufzeichnung der Studienszenen und die nachträgliche Bearbeitung oder weitere Simulation möglich sind.

In den folgenden Kapiteln der Anwendungsstudien gewinnt der Leser eine Übersicht des Vorgehens zur Planung der Testfeldverwendung und der Einsatzmöglichkeiten in maritimen Studienkontext. Hierin werden viele der zuvor aufgestellten Fragestellungen aufgegriffen und Lösungen für den stationären Einsatz von multimodalen Sensorsystemknoten und die Verwendung von optische Sensoren vorgestellt, um ein weites Gebiet mit einem Testfeld abzudecken. Weiterhin besteht auch die Möglichkeit das entwickelte Testfeldsystem in mobilen Studienkontext einzusetzen. Die Techniken und das Vorgehen in den folgenden Anwendungsstudien können ebenfalls auf andere weiträumige Umgebungen übertragen werden. Beispielsweise für Verkehrs-, Flughafen- oder andere landseitige Beobachtungsstudien.

Wie bereits eingangs dieser Arbeit aufgezeigt sind zu Beginn einer Anwendungsstudie entsprechende Nutzergruppen und deren Anwendungsbereichs-Interessen zu identifizieren. In den folgenden Studienfällen werden vordergründig Forschungs- und Entwicklungsvorhaben mit optischen Sensoren im maritimen Umwelt- und Verkehrsbereich betrachtet. Vorwiegend ist es hilfreich die Studienumgebung durch eine Vorabbesichtigung näher zu inspizieren sowie GIS (Geoinformationssysteme) oder CAD (Computer-Aided Design) Planungstools für die Identifikation von vielversprechenden Sichtbereichen der optischen Sensoren hinzuzuziehen. Oftmals muss von Fall zu Fall der Testfeldapplikation entschieden werden, welche Strategie am günstigsten, in Bezug zu Zeit, Kosten, Aufwand und Ergebnissen umsetzbar ist, um eine Anwendung der Umweltlagebilderstellung repräsentativ und damit erfolgreich zu gestalten.

Für eine weiterführende Betrachtung einer Sensoreinsatzplanung und der Integration in realen Studienumgebungen wird an dieser Stelle auch auf die Veröffentlichung von Abidi et al. 2008 für den interessierten Leser hingewiesen.

6.2 Überblick

Durch die Nutzung des vorgestellten Testfeldsystems in maritimen Bereichen und angrenzenden Küstenregionen sollen vielseitige Studienumgebungen erschlossen werden um in situ Experimente unter realen Bedingungen durchzuführen. Zu diesem Zweck können bspw. Häfen oder Schiffe mit dem Testfeld ausgestattet werden und so als Forschungshafen oder Forschungsschiff aufgewertet werden.

Das vorgestellte Testfeld soll u. a. die multiple Verteilung von optischen Sensorinformationen in Form eines Umweltlagebildes für Teilnehmer an Land / See über kanalisierte Datenstromschnittstellen ermöglichen. Im Kontext für e-Navigation Anwendungen (Ince et al. 2012) werden Szenarien für die Onlineerkennung relevanter Situationen vorgestellt und damit die zuvor aufgestellten Anforderungen und Arbeitsweisen unter realen Einsatzbedingungen erprobt und dadurch evaluiert.

Der Hafen ist eines der komplexesten maritimen Szenarien für Beobachtungssysteme zur Umweltlagebilderzeugung. Bei hohem Verkehrsaufkommen auf Wasserwegen und in Häfen kommt es häufig zu Gefährdungssituationen. Auch bei An- und Ablegemanövern in Schleusen und Häfen müssen Schiffe in schlecht einsehbaren Bereichen manövrieren. Hierbei soll durch die Erzeugung und Teilung eines Umweltlagebildes verteiltes Situationsbewusstsein gefördert werden, was die Sicherheit und Effizienz im Verkehrsbetrieb erhöhen kann (Goslin 2008). Sicherheitskritische und umweltgefährdende Situationen können durch obskure Informationsverwaltung, z. B. unzureichende Verbreitung oder falsche Beurteilung einer lokalen Bedrohung hervorgerufen werden (Hall und Jordan 2010). Kapitäne und Lotsen können in solchen Situationen unterstützt werden, indem Ihnen ein umfassendes Bild der näheren Umgebung zur Verfügung gestellt wird. Die Entwicklung sowie Tests neuer Dienstleistungen mittels optischer Sensoren in realen Studiumgebungen bietet weiterhin Unterstützung zu bestehenden Informationssystemen (Heilig und Voß 2016). Kamerasensoren (VIS, IR) und LIDAR-Laserscanner sollen in diesem Zusammenhang in natürlichen Umweltbereichen im vorgestellten Testfeld eingesetzt und Anwendungen erprobt werden. Videosensoren sind weit verbreitet für die zivile Überwachung und liefern ein situatives Bild (Trivedi et al. 2005). Darüber hinaus wird optische Fernerkundung für (in diesem Fall maritime) Umweltbeobachtungen zunehmend wichtiger (Holman et al. 2003; Jan Schulz et al. 2016; Zielinski et al. 2009; Rüssmeier et al. 2016).

In generischen Studien soll dazu eine Sensorsysteminfrastruktur mit dem Testfeld in Häfen sowie auf Schiffen demonstriert werden, um folgende Szenarien zu ermöglichen:

- An- und Ablegeassistenz in Häfen und Schleusen
- Umgebungsbild des Schiffes für Kapitäne und Lotsen bereitstellen
- Erkennung von Personen im Wasser mittels optischer Sensoren
- Fernerkundung der Meeresoberflächentemperatur

6.3 Studiengebiet und Testfeldausstattung

Das Testfeld für in situ Versuche wurde in dem Hafen Bremerhaven, Geestemündung, Deutschland (53°32.133'N, 8°34.667'E) als „Forschungshafen“ eingesetzt. Mit seinen hoch frequentierten Fährterminals und Liegeplätzen am Eingang zu einer Doppelschleuse sowie der vorgelagerten Wasserstraße bietet dieser Hafen ein geeignetes Studiengebiet für die optischen Sensorsysteme, um verschiedenste Anwendungen zu erproben. Nach vorhergehender Standortbegutachtung und Einsatzplanung wurden bis zu vier geographisch verteilte Beobachtungsstationen temporär mit den autarken Sensorsystemen ausgestattet und mittels Ad Hoc-WLAN-Link lokal vernetzt. Für die Vernetzung über größere Distanzen > 250 m wurde eine omnidirektionale WLAN-Richtfunkverbindung mittels Richtfunkantennen zwischen einer Basisstation und Testfeldsystemknoten eingesetzt. Die Positionierung der Sensorsystemknoten wurde wie zuvor in Kapitel 2.6.3 beschrieben mit einem GIS-Programm ArcMap 10.2.1 (Esri GmbH, Deutschland) in der 2-dimensionalen Fläche, unter Berücksichtigung standortspezifischer baulicher Gegebenheiten, der maximal realisierbaren WLAN-Reichweite sowie unter Berücksichtigung von Sichtabdeckungen, realisiert. Der jeweilige abgedeckte Sichtbereich im Testfeldgebiet durch vier VIS-Kameras, drei LIDAR-Scannern und einer IR-Kamera, ist in Abbildung 6.1 (unten) durch blaue Teilkreise hervorgehoben, wobei die beobachtete Fläche in diesem Fall ~ 100000 m² betrug. Das gesamte Testfeld konnte unter geringem Zeiteinsatz vor Ort installiert und in Betrieb genommen werden. Konfiguration und Metadaten der Testfeld-Serverinstanz wurden an der Basis- Landstation für die folgenden Einsatzszenarios automatisiert angelegt, Details dazu sind in Kapitel 5.3.7 beschrieben. Die Studien-Szenarien wurden auch gespeichert, wobei jede Clientinstanz die eingehenden Rohsensordaten und Metadaten lokal aufzeichnete. Diese können später für Szenario-Wiederholungen innerhalb des Datenstrom-Frameworks verwendet werden.

Zusätzliche Offshoreanwendungen wurden während weiterer Kampagnen in unmittelbarer Nähe zu den Jade Weser Port Terminals, (Wilhelmshaven, Deutschland, 53° 35.500'N, 8° 9.300'E) durchgeführt. Die Einsatzzeiträume betrug dabei bis zu 10 Stunden, in denen unterschiedliche Manöver mit dem schiffsgetragenen Testfeld realisiert wurden.

Detailliertere Testfeldausstattungen werden jeweils in den folgenden Abschnitten aufgeführt.

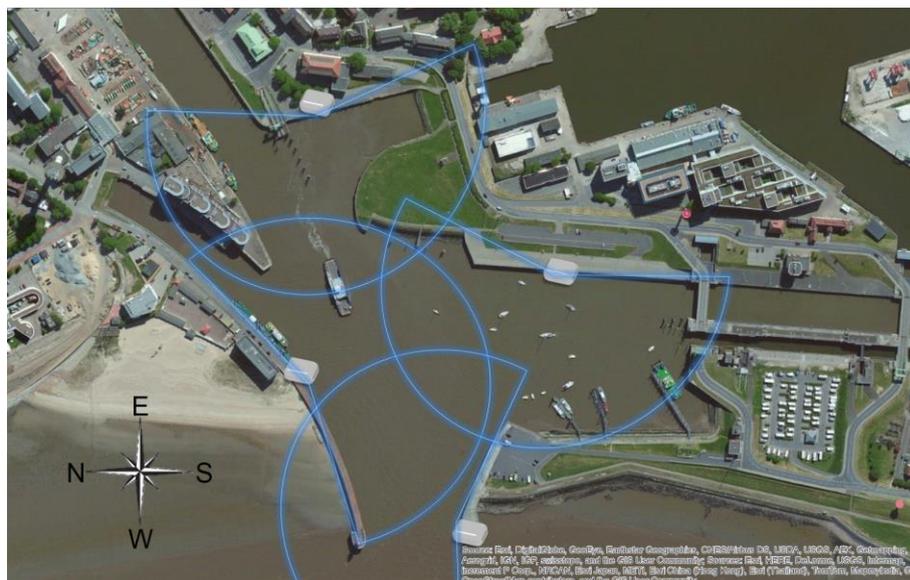
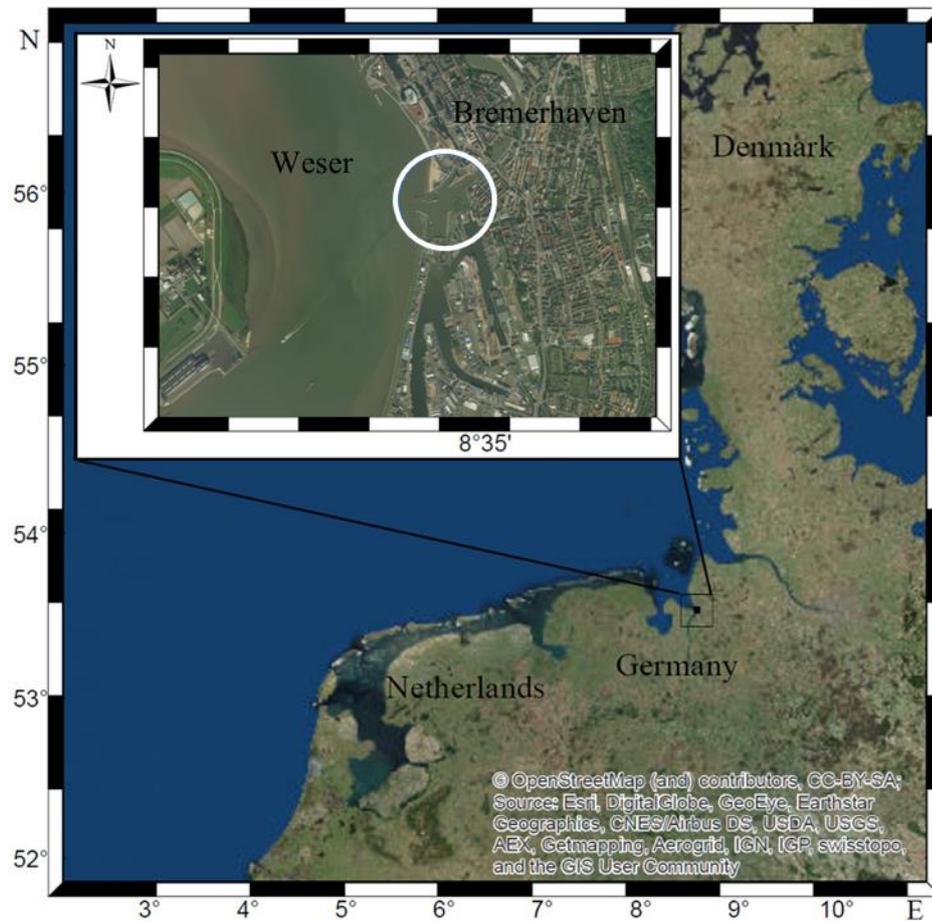


Abbildung 6.1: Geographische Lage und Position des Studiengebietes für stationäre Beobachtung mit Hafenbereich, Innenhafen und vorgelagerter Wasserstraße (Weser) in Bremerhaven (oben). Übersicht des Testfeldgebietes mit verteilten Sensorsystemen im Studiengebiet Hafen Bremerhaven Geestemündung (unten), die Sichtbereiche der optischen Sensoren sind durch Teilkreise hervorgehoben. Im unteren Bild weiter ersichtlich, Fähranleger (oben), Doppelschleuse (rechts) und die Hafeneinfahrt (unten)

6.4 Anwendungen mittels Umweltlagebilderzeugung

6.4.1 Stationäre Anlegeassistentz

Unterstützende Anwendungen im Hafenbereich für Anlegemanöver sind mit unterschiedlichen Technologien wie DGPS, Ultraschall, Radar oder Laserabstandsmessung realisiert (Gucma et al. 2010) und kommerziell verfügbar. Dabei werden Informationen auf lokalen oder mobilen Anzeigeinstrumenten bereitgestellt. Forschung und Entwicklung dazu konzentrieren sich unter anderem auf die Verbesserung der Empfindlichkeit und Auflösung von z. B. LIDAR Sensoren (Jimenez et al. 2004). Die Kombination von mehreren und unterschiedlich arbeitenden optischen Sensoren für diese Anwendung verspricht jedoch eine Ergänzung zu bereits etablierten Verfahren und soll in folgenden Fallstudien mit dem Testfeld erprobt und demonstriert werden.

Anlegeassistentz-Tests wurden mit stationären Onshore- sowie mit mobilen Offshore-positionierten Sensorsystemen durchgeführt. Ziel dieser Untersuchungen ist es, die Anwendbarkeit bei unterschiedlichen Arbeitsprinzipien (Onshore- und Offshore betriebenen Systemen) zu testen und die Testfeld-Anforderungen zu evaluieren.

Für die Onshore-Demonstration wurde das Umweltlagebild mit Video- und Laserscannerdaten (Sensoren, in Kapitel 5.1.4 eingeführt) aus dem Bereich des Forschungshafens (Abbildung 6.1, unten) drahtlos zwischen den stationären Sensorsystemen und dem Forschungsschiff (FS) Heincke¹¹ vice versa übertragen. Letzteres wurde mit einem auf dem Backdeck positionierten Sensorsystemknoten und in Fahrtrichtung positionierter visueller Kamera sowie LIDAR-Scanner ausgestattet. Der schiffsgetragene Testfeld-Sensorsystemknoten wurde dabei über eine LTE-Verbindung und VPN (siehe Kapitel 5.2.4) in dem Hafentestfeld eingebunden, womit auch Datenübertragungen für Manöver außerhalb der Testfeld WLAN-Netzreichweite (~250 m) abgedeckt wurden. Das Umweltlagebild wurde mittels der Admin-Client-Anwendung (in Abbildung 5.14 eingeführt) auf der Brücke des Forschungsschiffs (in Abbildung 6.2 gezeigt) sowie auch von einer Admin-Client-Anwendung an einer Landstation in der Nähe der Fährterminals im Hafen, dargestellt.

¹¹ Das Forschungsschiff Heincke zählt zu den mittelgroßen deutschen Forschungsschiffen; L: 54,2 m, B: 12,5 m, Tiefgang: 4,16 m; Heimathafen: Helgoland, Betreiber: Alfred-Wegener-Institut (AWI); Quelle: <http://www.deutsche-meeresforschung.de/de/heincke>.



Abbildung 6.2: Livepräsentation von funkübertragenen Datenströmen auf der Brücke des Forschungsschiffs Heincke. Visuelle Kamera auf der linken Bildschirmseite, LIDAR-Scanner auf der rechten Bildschirmseite

Innerhalb der Doppelschleuse wurden routinemäßige Anlegemanöver durchgeführt, bevor das Schiff in den vorderen Hafengebiete (in den optischen Erfassungsbereich der stationären Sensorsysteme) einfuhr. Weitere Tests innerhalb des visuell erfassten Hafengebiete wurden durchgeführt, während das FS den Liegeplatz in Richtung Hafenausfahrt verließ. Sowie ausgehend von der vorgelagerten Wasserstraße bei Einfahrt in den Hafen zum Anlegeplatz.

In allen Testfällen konnte ein flexibler Blick in Form eines Umweltlagebildes aus verschiedenen Szenen der maritimen Testfeldumgebung für alle Teilnehmer bereitgestellt werden, was vor allem einen gegenseitigen Nutzen für die Sicherheit während der Einfahrt in den Hafen von der kommenden Wasserstraße darstellt. Die enge Eingangspassage des Hafens wird von Fähren, zusammen mit anderen kleinen privaten und großen Transportschiffen genutzt und verdeutlicht den unterstützenden Mehrwert für die Koordination von Manövern durch die Nutzung des Umweltlagebildes. Der „Forschungshafen“, bietet damit repräsentative Ergebnisse aus einem wohlbekanntem Studiengebiet für weitere upscaling-Ansätze.

6.4.2 Mobile Anlegeassistentz

Weitere Studien für die Unterstützung bei Anlegemanövern wurden mittels eines mobilen Testfeldes durchgeführt, welches auf dem Forschungsschiff Senckenberg¹², eingerichtet wurde. Zwei LIDAR-Scanner wurden mittschiffs auf Backbord- und Steuerbordseite platziert (beide auf Arbeitsdeckebene ca. 1 m über der Meeresoberfläche). Diese Position bietet einen ungehinderten horizontalen Abtastbereich von 180° bei 20 Metern Erfassungsradius zur Abdeckung der Seiten- / Bordwände, wie in Abbildung 6.3 dargestellt. Zusätzlich wurden zwei, mit Weitwinkelobjektiven (Fujinon FE185C086HA-1, Fujifilm Corporation, Japan) ausgerüstete, visuelle Kameras auf der hoch gelegenen Brückenebene positioniert und auf das Sichtfeld der LIDAR-Scanner ausgerichtet. Diese lieferten das entsprechende Live-Videobild zu den LIDAR-erfassten Objektstrukturen. Durch die Sensorkombination von LIDAR und visuellen Kameras soll u. a. die LIDAR-Polarkoordinaten-Distanzabbildung ergänzt werden. Da der horizontale LIDAR Abtastbereich eine entsprechende Objekthöhe über der Meeresoberflächenebene zur Erfassung von Strukturen voraussetzt, können niedriger gelegene Strukturen nicht abgebildet werden. Insbesondere bei Hochwasser und tideabhängigen Anlegestellen besteht somit die Möglichkeit von LIDAR-Sensoren nicht erfasste, ausbleibende Strukturen während der Anlegeunterstützung mit den Videobildern zu ergänzen.

Weiterhin wurden zwei Kameras (VIS, IR) in Fahrtrichtung auf dem Backdeck (ca. 6 Meter über der Meeresoberfläche), mit leicht geneigtem Sichtbereich zur Wasseroberfläche des vorderseitigen Fahrtwassers hin eingesetzt, Sichtbereich wird in Kapitel 6.4.5 gezeigt. Insgesamt wurde das Testfeld durch zwei Sensorsysteme (Backdeck und mittschiffs) mit insgesamt sechs optischen Sensoren auf dem Forschungsschiff eingerichtet und bietet damit ein nahes Umgebungsbild des Schiffes, gezeigt in Abbildung 6.3.

Mehrere Anlegemanöver wurden von Steuerbord- sowie Backbordseite aus durchgeführt und dabei unterschiedlichen Anlegestellen getestet (JadeWeserPort, Wilhelmshaven, Deutschland, hoch gelegene Kai-Schottwand und Nassauhafen, Wilhelmshaven, Deutschland, schwimmender Pontonanleger, beide Tidehäfen).

¹² FS Senckenberg; L: 29,5 m, B: 7,6 m, Tiefgang: 2,7 m; Heimathafen: Wilhelmshaven, Betreiber: Senckenberg Gesellschaft für Naturforschung; Quelle: http://www.deutsche-meeresforschung.de/de/senckenberg_schiff.

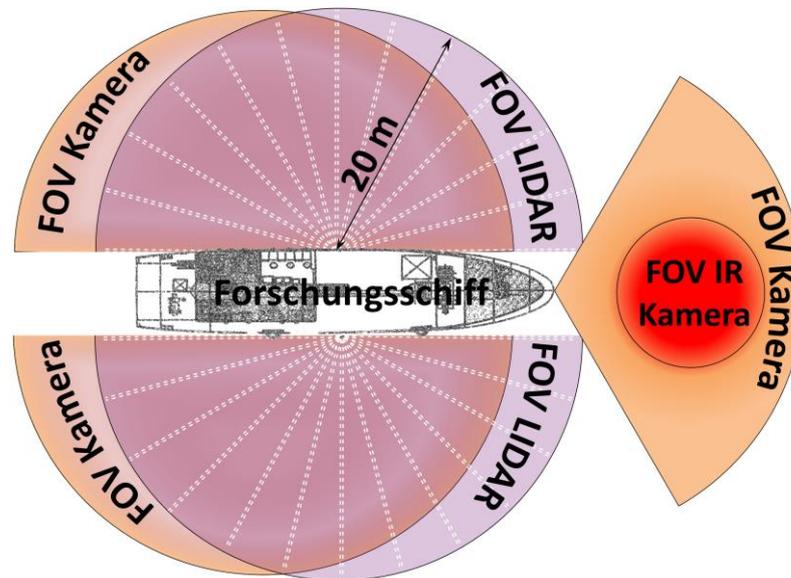


Abbildung 6.3: Testfeld mit schiffsgestütztem Sensorsystem-Setup und Sichtfeld (FOV) auf dem Forschungsschiff Senckenberg; LIDAR-Scanner und visuelle Kamera jeweils an Backbord- und Steuerbordseite; Visuelle- und Infrarot-Kamera auf der Backdeckebene in Fahrtrichtung ausgerichtet und zur Wasserfläche geneigt

In Abbildung 6.4 oben ist dazu das Umgebungs-Lagebild des Schiffes mit der Admin-Client Applikation dargestellt. Beispielhaft in Abbildung 6.4 unten, aufgezeichnete LIDAR Daten der Kaianlage (JadeWeserPort) sowie ein LIDAR-Scanner auf dem Arbeitsdeck während eines Anlegemanövers. Das Live-Umweltlagebild wurde in diesen Fällen in einem Raum unterhalb der Brücke dargestellt. Eine direkte Verbindung auf die Schiffsbrücke wurde aufgrund fehlender Netzinfrastruktur im Schiff nicht realisiert, eine stabile WLAN-Verbindung auf die Brücke war aufgrund der Stahlaufbauten vom Schiff beschränkt einsetzbar.

Für die realisierten Testfeldstudien mobil / stationär liefern die LIDAR-Scanner Distanzauflösungen von weniger als 0,1 m, eine ausreichende Leistung für Anleeanwendungen, wie ebenfalls von anderen Studien (Jimenez et al. 2004) bestätigt wurde. Umgebungsbedingungen wie z. B. niedrige Objektoberflächen-Remission (Infrarot, 905 nm) von (Schiffs) Farben oder Biofouling können LIDAR-Scanner-Messungen (Verringerung des Erfassungsbereichs) stören (SICK AG 2015).

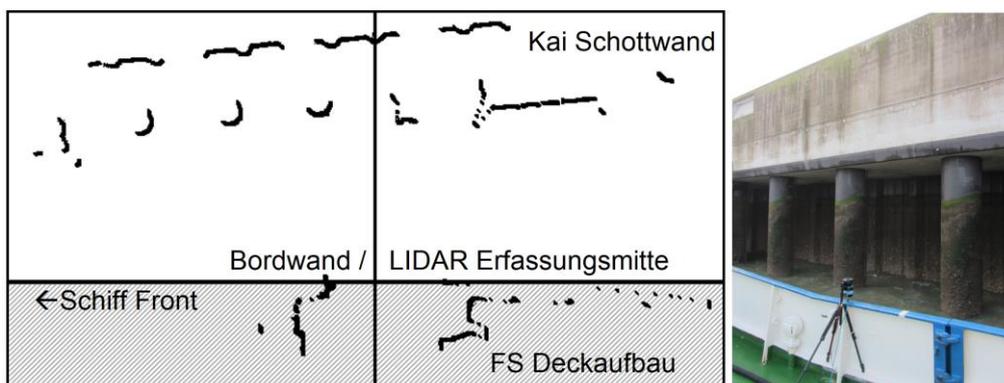
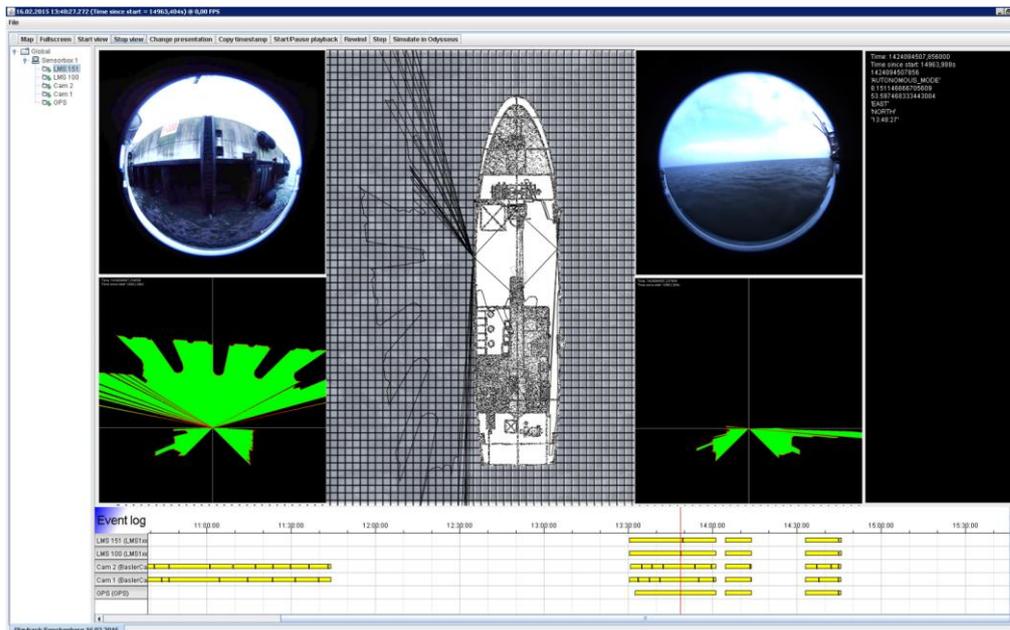


Abbildung 6.4: Anlegeassistenten-Applikation, Livedarstellung im Admin-Client mit Weitwinkelkameras (oben); zugehörige erfasste LIDAR Daten werden auf der MAP (Schiffumriss) dargestellt, rechts GPS Metadaten. LIDAR Daten der Kaianlage (Jade Weser Port) während eines Anlegemanövers (unten, links). Abbildung des Zugehörigen schiffsgetragenen LIDAR-Sensors auf steuerbord Arbeitsdeck (unten, rechts)

Es empfiehlt sich daher die Anordnung des Testfeldaufbaus mit den entsprechenden Sichtfeldern sowie die Positionen der verteilten optischen Sensorsysteme im Feldstudienbereich vorab zu untersuchen, um nachteilige Effekte zu minimieren beziehungsweise zu vermeiden.

Durch den Vergleich von dem stationär und mobil applizierten Testfeld ist es offensichtlich, dass individuelle Vor- und Nachteile für die jeweiligen untersuchten Applikationsansätze bestehen. Stationäre Testfelder mit verbundenen Sensorsystemen decken ein großflächiges Gebiet ab, wie im Forschungshafen gezeigt. Diese bieten für alle Teilnehmer einen gegenseitigen Nutzen, aber der individuelle Informationswert für einzelne Benutzer hängt von den jeweiligen Erfassungsbereichen der optischen Sensoren ab. Auf der anderen Seite stellt der mobile, mit schiffsgetragenen Sensoren betriebene, Ansatz eigene unabhängige Information für einen einzelnen Benutzer zur Verfügung, wobei der gegenseitige Nutzen für andere Verkehrsteilnehmer eingeschränkt ist.

In den Studien der Anlegemanöverunterstützung konnten Potenziale für die Anwendung und Kombination mehrerer optischer Sensoren mit unterschiedlichen Arbeits-, Erfassungs- und Sichtbereichen aufgezeigt werden. Weiterhin eignen sich die Demonstrationen in realen Studiumgebungen um Erweiterungsmöglichkeiten zu identifizieren. Hilfreiche Informationen dazu können so direkt von Anwendern (Kapitän / Lotse) vor Ort gegeben und berücksichtigt werden. In allen Fällen zeigen die Ergebnisse einen Erfolg durch die Anwendung von flexiblen Testfeldern mit optischen Sensorsystemen, die somit die Möglichkeit bieten Anwendungen in realen Studienbereichen zu entwickeln, zu testen und zu demonstrieren.

6.4.3 Person über Bord Situation

Eine lebensgefährdende Situation kann eintreten, wenn eine Person über Bord gerät. Besonders Seefahrer oder Hafenarbeiter sind dieser Gefahr ausgesetzt. Um die Unterstützung für die Lokalisierung einer Person im Meerwasser zu demonstrieren, wurde ein kontrollierter Test (ohne Lebensgefahr) mit einem schiffsgetragenen Testfeld durchgeführt. Dazu sollte insbesondere die Eignung von bildgebenden Sensoren der infrarot Kamera- Technologie untersucht werden. Infrarot-Thermokamera-Technologie ist nicht auf Tageslicht angewiesen und funktioniert auch ohne Belichtung einer Szene oder eines Objekts mit sichtbarem Licht. Durch diese Nachtsichtcharakteristik ergeben sich Vorteile für Such- und Rettungsmissionen (Person SAR, Search and Rescue), wie auch durch andere Studien verdeutlicht (Martins et al. 2013). Durch das attraktive Preis-Leistungs-Verhältnis sind diese IR-Kameras potentiell auch für Schiffsreederei, Lebensrettungs-Gesellschaften und kleinere Standorte interessant. Aus diesem Grund wurde die thermische

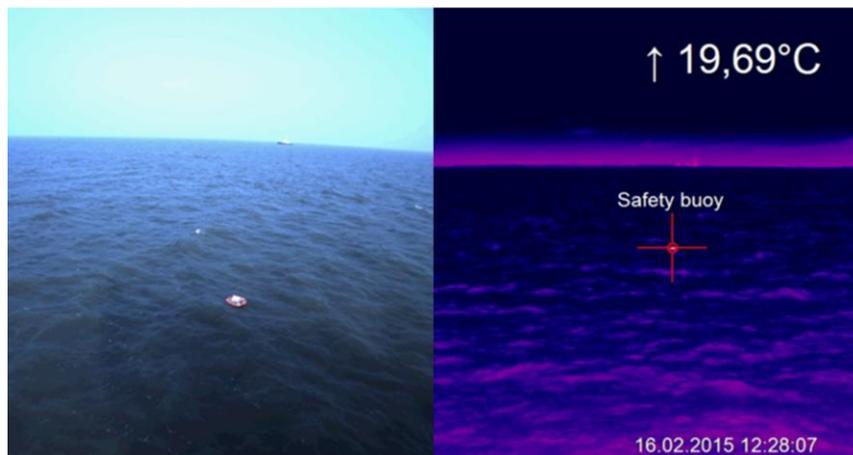


Abbildung 6.5: Person über Bord Manöver, beobachtet durch schiffgetragene optische Sensoren. Visuelles Videobild (links) und Infrarot-pseudofarben Videobild (rechts)

Bildinformation (7,5 μm - 13 μm Band) der Infrarotkamera verwendet um ein warmes Objekt, welches eine Person auf dem offenen Meer simuliert, zu lokalisieren und zu verfolgen. Zusätzlich stellt eine visuelle Kamera das entsprechende Live-Videobild der beobachteten Szene bereit, dargestellt in Abbildung 6.5. Diese Sensorkombination bietet eine gegenseitige Unterstützung und ermöglicht synoptische Informationen, um eine kritische Situation zu erkennen während Tageslicht vorhanden ist.

Das Testfeld wurde an Bord des FS Senckenberg eingesetzt, wie in Abbildung 6.3 dargestellt. Alle Untersuchungen wurden offshore durchgeführt. Eine treibende Person wurde mittels eines wassergefüllten Behälters (Anfangstemperatur 40 °C) simuliert. Dieser wurde auf einem Rettungsring befestigt und in das (4,5 °C) kalte Wasser abgesenkt (im Februar durchgeführt). Anschließend entfernte sich das Schiff bis zu 400 Meter vom Rettungsring. Die Temperaturdifferenz des warmen Körpers verringerte sich im Verlauf der Zeit durch Wärmeaustausch mit dem umgebenden Wasser. Eine Erkennung mit 3 \times 3 Pixel MFOV (Messobjekt-Sichtfeld) der maximalen Temperatur in der thermischen Bildmatrix wurde mittels integrierter Datenanalyse der IR-Kamera durchgeführt. Durch diese Beobachtung und Nachverfolgung konnte der warme Körper (bis zu 1 K Temperaturunterschied zwischen Objekt und Umgebung) innerhalb der ersten 10 Minuten sowie bis ca. 150 Meter Objektentfernung sicher identifiziert werden, dargestellt in Abbildung 6.5. Ein Minimum von 3 \times 3 Pixel MFOV ist daher empfohlen und repräsentiert 750 mm² Objektfläche bei 150 Meter Entfernung zum Messobjekt. Dies entspricht in etwa dem, über der Wasseroberfläche sichtbaren, Teil einer schiffbrüchigen Person samt

Rettungsring. Für eine 1×1 -Pixel-Auswertung konnten keine zuverlässigen Ergebnisse erzielt werden um das treibende Objekt von der Umwelt zu diskriminieren. Hierbei ergeben sich Störungen im Abfragebereich aufgrund von IR-Reflexionen an Wellenstrukturen, ersichtlich in Abbildung 6.5, rechts. Das minimale Messobjekt-Sichtfeld unterschreitet die erforderlichen 3×3 Pixel für das verfolgte Objekt für Distanzen > 150 Meter unter Berücksichtigung der Objektiv-Brennweite / des Öffnungswinkes ($f = 18,7 \text{ mm} / 38^\circ \times 29^\circ$). Darüber hinaus maskierten Wellen das verfolgte Objekt bei Abständen über 150 Meter für die verwendete Kameraperspektive. In diesem Fall wurde als wärmstes Objekt ein Schiff am Horizont identifiziert, ersichtlich am Horizont in Abbildung 6.5.

Durch diese Person über Bord Studie wurden auch Informationen über die Eigenschaften optischer Sensoren sowie der Messanordnung erhalten, um die Limitierung des minimalen Detektionsabstandes zu erweitern. Zum einen gibt es potentiell geeignetere und praktischere Beobachtungsebenen zur Minimierung von Wellen- Maskierungseffekten, z. B. Oberhalb der Brücke des FS (ca. 10 Meter über der Meeresoberfläche). Diese Position könnte zusätzlich bis zu 100 m Erfassungsdistanz zu treibenden Objekten auf der Meeresoberfläche realisieren. Durch die Verwendung von Infrarot-Teleobjektiven ($13^\circ \times 10^\circ$) wären zusätzliche 260 Meter Erfassungsdistanz unter Beibehaltung von 3×3 Pixeln (MFOV) realisierbar, (aus Anhang F: IR Kamera-Objektbetrachtung entnehmbar). In diesem Zusammenhang sind auch neue Infrarotkameramodelle mit einer optischen Auflösung bis zu 640×480 Pixel im Vergleich zum angewandten (382×288 Pixel) Infrarotkameramodell vielversprechend. Weiterhin besteht auch Potenzial für verrauschte IR-Bildinformationen oder bei geringen Temperatur-Intensitätsunterschieden von Umgebung und Objekt, Bildbearbeitungsalgorithmen einzusetzen (Hu et al. 2010; Kim und Lee 2014) welche eine erweiterte und robuste Objektidentifikation ermöglichen können. Abschließend zu den technischen Ergebnissen kann die Verwendung des mobilen Testfeldes mit optischen Sensoren SAR Einsätze bei Person über Bord Situationen unterstützen. Mit dem Testfeld ist eine schnelle, flexible Ausstattung von Schiffen mit zusätzlichen optischen Sensoren möglich. In Anbetracht der Ernsthaftigkeit von lebensbedrohlichen Situationen unterstützt die Verwendung dieser vorgestellten Technologie das Situationsbewusstsein durch die Bereitstellung sicherheitsrelevanter Informationen, wobei alle anderen nur möglichen Verhaltens- und Sicherheitsvorkehrungen immer noch unverzichtbar bleiben.

6.4.4 Stationäre Umweltbeobachtung

Optische Sensorsysteme sind als Fernerkundungsinstrument für marine Umweltforschung und operationelle Anwendungen sehr relevant (Moore et al. 2009). Thermische Infrarot-Bildgebung liefert Informationen über die Meeresoberflächentemperatur (SST), die sich aufgrund wechselnder Umgebungsbedingungen sehr schnell ändern kann (z. B. Erwärmung und Abkühlung im Tagesverlauf nach dem täglichen Zyklus der Sonneneinstrahlung). SST ist eine primäre und daher wichtige Variable für Luft-Ozean-Wechselwirkungen. Mit der passiven IR-Fernerkundung werden Informationen der Oberfläche über den Infrarot-Emissionsgrad abgeleitet, und wenn auf Wasser angewendet, aus einer Schicht von nur wenigen Mikrometer dicke. Der Infrarot-Emissionsfaktor von Meerwasser, der für Nadirbeobachtungen abgeleitet wird, liegt im Bereich von 0,96 - 0,99 für Wellenlängen die für die thermische Fernerkundung relevant sind (die entsprechende ideale emittierte Strahlung vom planckschen Strahler (schwarzer Körper) beträgt 1,00) und kann daher als hoch angesehen werden (Soloviev und Roger Lukas 2014).

Die Beobachtung der SST steht in engen Bezug zu Tensiden, Oberflächenfilmen, thermischen Konvektions- oder Verschmutzungseinwirkungen und zählt zu einem der Indikatoren für den „*Good environmental status of marine ecosystems*“ (Borja et al. 2013). Das hier vorgestellte Testfeld soll in diesem Zusammenhang Zugang zur räumlich-zeitlichen Variation der SST, z. B. lokale Temperaturmuster, für stationäre und mobile Applikationen ermöglichen. Damit wäre die Klassifizierung unterschiedlicher Wassermassen möglich oder könnten Bereiche identifiziert werden die eine spezifische Betrachtung für den Zusammenhang und ggf. Beeinflussung von Umwelt, Infrastruktur und Verkehr ermöglichen. Darüber hinaus wäre eine schnelle und flexible Anpassung von Feldstudieneinsätzen an die Gegebenheiten vor Ort durch das Umweltlagebild möglich, um raum-zeitliche-Variationen zu berücksichtigen.

Als Teil einer stationären Applikation im Hafen Bremerhaven wurde das Testfeld, wie vorhergehend in Kapitel 6.3 beschrieben, eingerichtet. Ein Sensorsystem war dabei mit dem FOV auf die Hafeneinfahrt, der Wasserstraße und das Fährterminal positioniert, dargestellt in Abbildung 6.1 (unten). Im radiometrischen Videobild der IR-Kamera wurden Bereiche von Interesse (ROI's) auf den Meeresoberflächenbereich im Hafen sowie auf den Wasserweg, in dem Schiffe passieren, vordefiniert (gezeigt in Abbildung 6.6, unten links). Die Live-Messausgabe resultiert dabei aus der mittleren Temperatur des jeweiligen ROI (Emissionsfaktor 0,96).

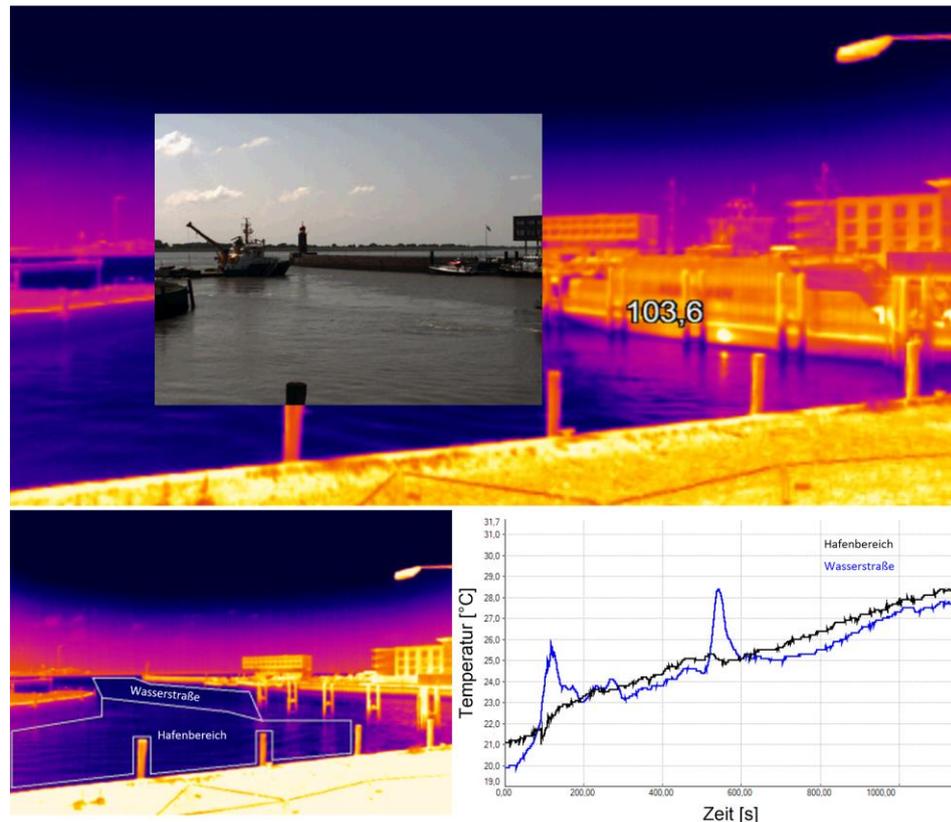


Abbildung 6.6: Sicht der Visuellen- und thermalen Infrarot-Kamera (Falschfarbenbild) im Testfeldgebiet des „Forschungshafens“ (obere Position in Abbildung 6.1, unten), gegenüberliegend die Hafeneinfahrt sowie rechts Fähranleger. ROI in IR-Videobild mit definierten Messregionen für eine Meerwasser-Oberflächentemperatur-Untersuchung (links, unten) und das korrespondierende Zeit- Temperaturprofil für den Hafenbereich sowie der Wasserstraße (rechts, unten)

In dem Zeit-Temperaturprofil des Hafen-ROI (schwarzer Graph in Abbildung 6.6, unten rechts) ist dabei die Erwärmung der Meeresoberfläche durch Sonneneinstrahlung bei wolkenlosem Himmel innerhalb von 20 Minuten (hier im Juni) ersichtlich. In dem Zeit-Temperaturprofil der Wasserstraße-ROI (blauer Graph in Abbildung 6.6, unten rechts) sind zusätzlich zur Wassererwärmung durch Sonneneinstrahlung zwei sprunghafte Temperaturpeaks ersichtlich. Nach 100 Sekunden während der Einfahrt einer Fähre, sowie bei etwa 500 Sekunden beim Verlassen der Fähre des Hafenbereichs. Der Versatz zwischen beiden ROI-Temperaturwerten verdeutlicht hier Unterschiede in der SST zwischen Wasserweg- und Hafenbereich, was in diesem Fall auf die Einwirkung von Verkehr bzw. unterschiedliche Vermischung von Wassermassen zurückzuführen war.

6.4.5 Mobile Umweltbeobachtung

Für die mobile Anwendung der Fernerkundung der SST wurde das Testfeld an Bord auf dem FS Senckenberg (wie in Kapitel 6.4.2 beschrieben) eingerichtet, wobei eine in Fahrtrichtung positionierte Infrarotkamera in Nadirsicht auf die Meeresoberfläche ausgerichtet wurde (Emissionsfaktor 0,96). Zusätzlich dazu stellte eine visuelle Kamera Videobilder des zugehörigen Bereichs in Vorderansicht zur Verfügung, dargestellt in Abbildung 6.3. Der Durchschnittstemperatur-Zeitverlauf der Meerwasser-Oberfläche resultiert dabei aus dem Mittel des gesamten IR-Kamera Sichtfeldes (Emissionsfaktor 0,96), präsentiert in Abbildung 6.7 (oben). Die Messungen wurden in der Nähe der Offshoreterminals vom JadeWeserPort, Deutschland durchgeführt. Die Route des Forschungsschiffs wurde so festgelegt das sowohl Messungen in der Nähe von Industrie- und Hafenanlagen, sowie auch rückwärtsgerichtete Fahrtmanöver untersucht werden konnten. Korrespondierende Szenen der visuellen Videobilder sind dazu in Abbildung 6.7 (unten) dargestellt, beginnend an der Terminalanlage und anschließend in Rückwärtsfahrt sowie darauffolgende parallel zum Terminalabschnitt.

Beginnend bei 4,5 °C Meerwasser-Oberflächentemperatur zeigt das Temperatur-Zeitprofil bei 150 Sekunden turbulente Wassermassen-Mischeffekte des Schiffs / der Schraube, während rückwärtsgerichteter Fahrt an. Dabei werden tiefer gelegene Wasserschichten an die Oberfläche gefördert und Schaum induziert. Weiter entfernte sich das Schiff auch von den Kaianlagen. Die Kombination von schiffsinduzierten Mischeffekten und Kaianlagen verursacht hierbei eine Temperaturänderung an der Wasseroberfläche von etwa 1 °C. In vorwärts gerichteter Fahrt wurde keine Beeinflussung von Schiff auf die Temperaturmessung festgestellt. Nach 290 Sekunden, während paralleler Fahrt in ca. 100 m Entfernung zu den Kaianlagen, zeigt eine höhere Wasseroberflächentemperatur von 6,5 °C den Übergang zu einem Offshore-Landungspier-Abschnitt an. In diesem Fall konnten somit unterschiedliche räumliche Beziehungen im Zeitverlauf der Sensorinformationen den Einfluss von z. B. Industrieinfrastruktur auf die Meerwasser-Oberflächentemperatur darstellen. Die Temperaturdaten zeigen insgesamt ein Rauschen im Bereich von $\pm 0,15$ K. Weiterhin driftet die Temperatur zwischen der kontinuierlichen Shutter-Kalibration (12 s Shutterintervall) der Infrarotkamera um ca. 0,2 K. Damit ist die erreichte Auflösung etwas höher als in den vorangegangenen Laboruntersuchungen, beschrieben in Anhang E: Auflösung, Stabilität, NUC, IR-Kamera, S: 177. Hierbei ist anzunehmen

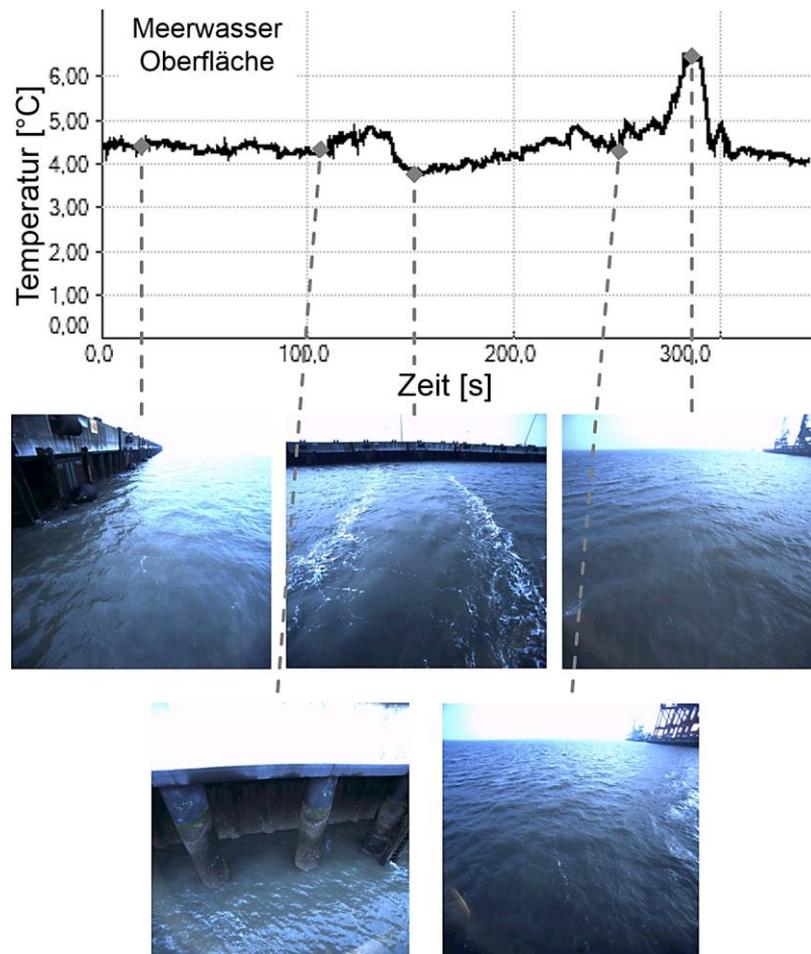


Abbildung 6.7: Durchschnittstemperatur-Zeitverlauf der Meerwasser Oberfläche, aufgenommen mit einer Infrarotkamera (identische Konfiguration wie in Abbildung 6.3) während einer offshore Kampagne im Bereich vom Jade-Weser Port, Deutschland (oben) und visuelle Videobilder der jeweiligen zugehörigen Szenen

das ein geringeres thermisches Rauschen des ungekühlten Mikrobolometer FPA aufgrund der niedrigen Umgebungstemperatur vorliegt.

Es ist anzumerken das die vorgestellten Temperaturmessungen in diesem Kapitel mit dem infraroten Mikrobolometer keine systematischen Messungen darstellen, sondern als Anwendungsfall-Demonstrationen des Testfeldes und der optischen Sensoren gesehen werden sollen. Die Ermittlung der Temperatur mit diesem Fernerkundungsverfahren variiert mit der Meeresoberflächen-Infrarot-Emissionsfähigkeit, im Bezug zu Umgebungstemperatur, Luftfeuchtigkeit, Blickwinkel, Salzgehalt sowie Rauigkeit der Meeresoberfläche (Wellen / Wind) (Kuenzer und Dech 2013; Garbe et al. 2004; Minkina und Klecha 2016).

6.4.6 Replay und Simulationsfunktionalität

Die Funktionalität der Szenen-Wiederholung (Replay-Modul) wurde mit aufgezeichneten Szenen aus fünf realen maritimen Anwendungsstudien mit der Admin-Client Applikation auf diversen Testfeldsystemknoten und einem externen Odysseus DSMS-Framework erfolgreich getestet.

Als stationäre Testfeld-Szenen wurden hierbei die Häfen Bremerhaven, Geestemündung sowie Wilhelmshaven, Nassauhafen aufgenommen. Weitere mobile Applikationen wurden auf den Forschungsschiffen Otzum, Senckenberg und Heincke in oben genannten Studiengebieten durchgeführt und als Testfeld-Szenen aufgenommen. Diese Szenen-Datensätze, wurden in den vorhergehenden Kapiteln zum Teil präsentiert und können in weiteren F&E-Vorhaben für die Demonstration oder Applikationsentwicklung, Trainingszwecke oder Simulationen verwendet werden.

Die Funktionalität der Sensordaten-Simulation (Simulations-Modul) wurde mit zwei aufgezeichneten Szenen-Instanzen aus der Admin-Client Applikation heraus durchgeführt. Die Datengrundlage bildeten die im vorherigen Kapitel beschriebenen Szenen-Aufzeichnungen eines stationären Umweltlagebildes in Bremerhaven sowie eines mobilen Umweltlagebildes auf dem FS Senckenberg. In einem Fall wurden auf einem lokalen DSMS-Framework, fünf aufgezeichnete Sensorressourcen in einer Odysseus Management-Server-Instanz simuliert und über die originalen DSMS-Operatoren verarbeitet (wie in dem JDL-Fusionsmodell, in Kapitel 5.3.3 aufgeführt). Auf einer zweiten lokalen Admin-Client Applikation wurden die, durch die Simulation neu initiierten Datenstrom-Sensorressourcen, wieder zu dem (neuen) originalgetreuen Umweltlagebild verarbeitet.

Ein weiterer Funktionstest des Simulationsmoduls wurde mit zwei Live-Videodaten-Sensorressourcen (VIS und IR) und vier aufgezeichneten Sensorressourcen (aus einer mobilen Testfeldapplikation) mittels zwei vernetzten Testfeldsystemknoten und entsprechend zwei vernetzter DSMS-Instanzen durchgeführt. Das Ziel hierbei war die verteilte Datenstrombearbeitung in der Simulationsumgebung mit der OdysseusNode-Funktionalität zu erproben. Sowie gleichzeitig neu initiierte Datenquellen (lokales Weltmodell) des lokalen Sensorsystemknotens mit dem aus dem Netzwerk zur Verfügung gestellten, simulierten lokalen Weltmodell als globales Weltmodell (Umweltlagebild) zu fusionieren. Die Ergebnisse zeigen, dass die parallele Nutzung



Abbildung 6.8: Testfeld für die Umweltlagebilderstellung als Demonstrator mit paralleler Anzeige einer Umgebungskarte (linke Anzeige), einer aufgezeichneten Studienszene aus aufgezeichneten Daten (mittlere Anzeige) sowie Live-Daten (rechte Anzeige) aus der direkten Umgebung

von Simulations-Modul und live Sensorsystemknoten möglich ist und mehrere verteilte Admin-Client-Applikationen an unterschiedlichen Endgeräten auf die jeweiligen lokalen (realen/simulierten) Weltmodelle zugreifen können.

Weiterhin wurden auch Skripte in Matlab Release 2015a (MathWorks, Inc.) implementiert um mit Java- FFmpeg-Bundles auf Testfeld-Videoquellen zuzugreifen und deren Videocodecs zu encodieren. Die Funktionalitäten der Skripte werden in Kapitel 7.5 näher beschrieben.

Die beschriebenen Funktionalitätstests dienen zur Funktionsevaluation und Demonstrationszwecken (dargestellt in Abbildung 6.8) ohne weitere spezielle Anwendungshintergründe.

6.5 Diskussion Umweltlagebilderzeugung, Testfeldevaluation

Basierend auf der vom Testfeld zur Verfügung gestellten Infrastruktur konnten unterschiedliche maritime Anwendungsstudien unter realen Studienbedingungen durchgeführt werden. Dabei wurden einzelne Datenströme von mobilen und stationär verteilten optischen Sensorsystemen zu einem situativen- Umweltlagebild fusioniert und für mehrere Nutzer / Anwender zur Verfügung gestellt. Für die Verwaltung, Verteilung und Fusionierung von verschiedenen Datenströmen wurde das universelle und flexible Datenstrommanagement-Framework Odysseus verwendet. Der Ansatz mehrere vernetzte, geographisch verteilte Sensorsysteme zu einem gesamten Testfeld zusammenzuschließen ermöglicht die Abdeckung von großen geografischen

Studiengebieten, hier demonstriert im Bereich des „Forschungshafen“. Beispielhaft, während der Anwendung mit mobilen schiffsgestützten Sensorsystemknoten, wurden verschiedene Datenströme von Sensoren während laufender Dienste in das Testfeldsystem integriert, wobei die ausgeführten Dienste und Queries von bestehenden Sensorsystemknoten nicht weiter betroffen sind.

Ein jeweiliges Umweltlagebild des situativen, maritimen Umweltzustands und auch maritime Verkehrsaktivitäten, konnte durch die gewonnenen Daten funktionell durch Datenfusionsabfragen kompiliert und live bereitgestellt werden. Hierbei konnten die verschiedenen Sensordatenströme von mehreren Clients angefordert werden und somit als Weltmodell umgehend geteilt werden. Im Studiengebiet des „Forschungshafens“ sowie Offshore durch schiffsgetragene Testfelder zeigt der Ansatz mit vernetzten Systemen und harmonisierten Systemaufbau als Forschungsplattform gute Ergebnisse für die Entwicklung, Demonstration und Nutzung für Verkehrs- und Umweltstudien unter realen Umgebungsbedingungen. Beispielsweise ermöglicht die räumlich-zeitliche Auswertung der optischen Sensorinformationen eines Testfeldes (Temperatur-) Muster innerhalb stationärer Onshore- sowie mobiler Offshore-Studiengebiete abzuleiten. Hier gezeigt für die Diskriminierung von Umweltzuständen und des maritimen Verkehrs. Weiterhin konnten umfassende Testfeld-Szenen aus mobilen und stationären Testfeldapplikationen aufgezeichnet werden. Wie in einigen Erprobungen erfolgreich nachgewiesen ermöglichen die Funktionalitäten des Testfeldsystems Wiederholungen und Simulationen von Testfeldapplikationen für Demonstrationsvorhaben und weitere Applikationen. Darüber hinaus bieten die Szenen-Datensätze die Grundlage um auch weitere F&E-Vorhaben zu unterstützen.

Die Möglichkeit mehrere Sensorsystemknoten des Testfeldes frei und flexibel in den zu untersuchenden Studienbereichen zu integrieren, bietet gerade auch für maritime F&E-Vorhaben Vorteile unter verschiedenen Aspekten. Oft sind die Infrastrukturen in Umweltstudienbereichen nicht vollständig entwickelt oder erschlossen und die Kommunikation und Energieversorgung für Sensoren damit begrenzt. Unter bestimmten Bedingungen ist ein Eingriff in vorhandene Infrastrukturen nicht möglich oder zulässig, beispielsweise die Veränderung bestehender Schiffselektronik. Die autarke Arbeitsweise und zentrale Verwaltung verteilter Sensorsysteme ermöglicht darüber hinaus Untersuchungen und Erkenntnisse ohne einen Eingriff oder einer Störung der Umwelt bzw. technischer Infrastruktur und ist damit für die Verwendung in sensiblen Umgebungsgebieten geeignet.

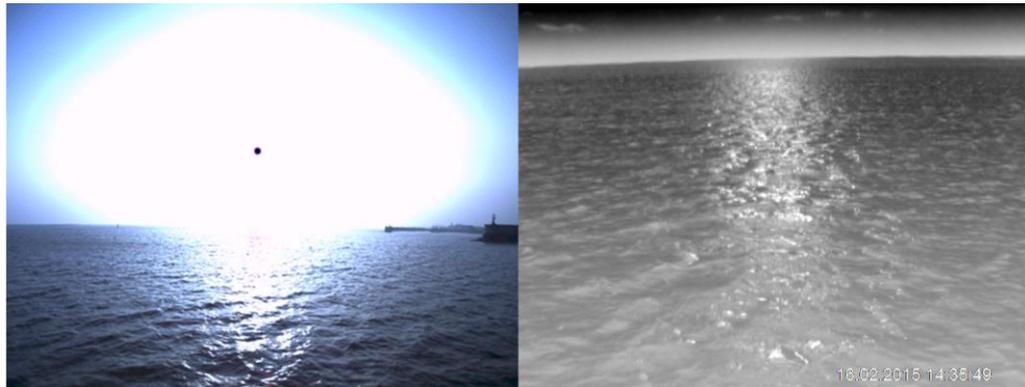


Abbildung 6.9: Beispiele von direkter Sonneneinstrahlung, Oberflächenreflexionen und Sonnenglitzern in unterschiedliche EO- Sensoren, visuelle Kamera (links), Reflexionen der Sonne und des Himmels an der Meeresoberfläche aus der gleichen Szene im infrarot-graustufen Bild (rechts)

Die Studien mit dem Testfeld in realen Umgebungen zeigen auch weitere Entwicklungspotentiale für Anwendungen mit optischen Sensoren auf und ermöglichen im Vorfeld deren Leistungsfähigkeit und Eignung in unterschiedlichen Anwendungen und Fragestellungen unter Umwelteinflüssen praktisch zu erproben und zu evaluieren. Als Folge der sich ändernden Umgebungsbedingungen wie Sonneneinstrahlung, Sonnenreflexionen oder thermische Reflexionen (Himmel, Wolken oder auch von Infrastrukturen) können die optischen Sensorinformationen und die erfassten Sichtbereiche der Szenen gestört werden (Burke 2013; Soloviev und Roger Lukas 2014). Beispielhaft in Abbildung 6.9 dargestellt, direkte Sonneneinstrahlung, Oberflächenreflexionen und Sonnenglitzern an der Meeresoberfläche, wobei der Dynamikbereich des Bildes der visuellen Kamera teilweise gesättigt ist und Reflexionen im infrarot-graustufen Bild auftreten. Auf der einen Seite bietet das Testfeld durch die Fusionierung mehrerer geographisch verteilter Sensoren sowie durch die Verwendung unterschiedlicher elektromagnetischer Empfindlichkeiten und Arbeitsweisen der EO-Sensoren die Möglichkeit Umweltstörungen oder -Einflüsse (wie das Vorhandensein von reflektiertem Sonnenlicht) zu differenzieren. Auf der anderen Seite können im Falle von optischen Störungen, diese jedoch auch als ergänzende Qualitätsinformationen und Markierungskriterien für Fernerkundungsstudien genutzt werden, wie auch in anderen Studien aufgezeigt (Garaba et al. 2012; Garaba und Zielinski 2013).

6.6 Zusammenfassung Umweltlagebilderzeugung

Die wichtigsten Ergebnisse der Umweltlagebilderzeugung- Studien zur Testfeldevaluation:

- Großflächige verteilte Gebiete können mit dem Testfeld funktionell ausgestattet und dadurch als Forschungsstandort erschlossen werden.
- Stationäre wie auch mobile Umweltlagebilderzeugung ist realisierbar.
- Mobile Sensorknoten können während des laufenden Testfeldbetriebs in das stationäre Testfeld integriert werden.
- Autarker Testfeldbetrieb ist bis zu 10 Stunden realisierbar.
- Komplette reale Testfeld-Szenen können leicht aufgezeichnet werden und als Datensätze für Wiederholungen sowie Simulationen verwendet werden.
- Die Wiedergabe und Simulation von Testfeld-Szenarien ist mit der Admin-Client Applikation durchführbar.
- Die Fusionierung von mehreren verteilten LIDAR-Scannerdaten und visuellen Kameradaten ist für Anlegeassistenzsysteme gut geeignet.
- Umweltlagebilder stehen mehreren Teilnehmern zur Verfügung, bieten verteiltes Situationsbewusstsein, ermöglichen die online Erkennung von relevanten Situationen und können unterstützend z. B. für Schiffsmanöver eingesetzt werden.
- Raum- / zeitliche- Beobachtungen von Temperatur-Sensordatenmustern ermöglichen die Diskriminierung zwischen Umwelt und Verkehr.
- Land- sowie Seeseitige Fernerkundung der Meeres-Oberflächentemperatur mit ungekühltem Mikrobolometer ist mit einer Auflösung von $\pm 0,15$ K unter Realbedingungen durchführbar.
- Eine automatisierte Erkennung von Personen im Wasser ist möglich, der Sichtbereich bei schiffsgetragenen Kameras ist jedoch eingeschränkt.
- Für SAR Anwendungen sollten hochauflösende optische Sensoren verwendet werden um das erforderliche MFOV nicht zu unterschreiten und große Sichtreichweiten > 150 m zu realisieren.
- Umwelteinflüsse durch z. B. Sonnenreflexionen sollten bei der Anwendungsplanung berücksichtigt werden.

7 Nutzung und Evaluation des Testfeldes für optische Strömungsmessung

Dieses Kapitels adressiert Anwendungsmöglichkeiten des Testfeldsystems und Prozeduren sowie Computer-Vision- und Datenfusionsansätze mit Fernerkundungssensordaten in der ozeanographischen Umgebung, zur kontaktlosen Messung von horizontalen Oberflächenströmungen mittels eines LSPIV-Verfahrens (Large Scale Particle Image Velocimetry). Hierdurch werden die Grundlagen zur Beschreibung der Dynamik von natürlichen aquatischen Systemen geschaffen. Die Wiederverwendung aufgezeichneter Daten durch ein offshore- stationiertes Testfeld unterstützt dabei die Entwicklung von neuen Anwendungen sowie die Optimierung bestehender Bildauswertungs-Strategien und deren qualitätsorientierte Verarbeitung. Die Anwendungsstudie dient dabei auch der Demonstration und Evaluation unterschiedlicher Testfeldfunktionalitäten.

7.1 Überblick

Die visuelle Beobachtung von Wasserströmungen durch die Erkennung und Interpretation von Oberflächensignaturen war eine der ersten Fernerkundungstechniken durch menschliche kognitive Fähigkeiten. In den letzten Jahrzehnten wurden Fernerkundungstechnologien durch optische Sensoren und Computer-Vision-Systeme automatisiert und bieten dadurch vielseitige Anwendungsmöglichkeiten (Grue et al. 2004). Hydrographische Zustände zeichnen sich durch unterschiedliche, u. a. physikalische Parameter des Meerwassers aus: Temperatur, Salzgehalt, Tiefe, Strömungen, Wellen, Turbulenz, Trübung (bezogen auf die Belastung von Schwebstoffen). Diese haben einen erheblichen Einfluss auf die Dynamik mariner Ökosysteme und können durch menschliche Aktivitäten, vor allem in Küstenregionen, teilweise nachhaltig verändert werden. Das Monitoring dieser Variablen ist daher wichtig um den Zustand des maritimen Lebensraums bewerten zu können und eine nachhaltige Entwicklung zum Schutz und Erhalt zu ermöglichen.

Im Folgenden wird in diesem Zusammenhang die Fähigkeit der Large Scale Particle Image Velocimetry Technologie untersucht um Informationen der Strömungsbedingungen an der Meeresoberfläche in Offshoreregionen zu erhalten. Zu diesem Zweck wurden folgende Untersuchungen in einem generischen Studiengebiet bei einer in der Nordsee Offshore-stationierten Dauermessstation (TSS) im Seegatt

zwischen den Inseln Langeoog und Spiekeroog (Deutschland) durchgeführt (Reuter et al. 2009). Flache ozeanographische Gewässerregionen, wie sie in Küstengebieten vorliegen, sind stark von der Gezeitendynamik betroffen und bieten interessante Studienumgebungen für die Messung zeitlich variierender Strömungsverhältnisse. Mit etablierten Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP) in situ Messsystemen sind diese Untersuchungen jedoch zugleich relativ aufwendig, anspruchsvoll und teuer. Vor allem die nahe Oberflächengrenzschicht ist für ozeanographische Atmosphärenaustauschprozesse von hoher Bedeutung (Soloviev und Roger Lukas 2014), wobei dieser Teil der Wassersäule nur teilweise durch die bestehenden Standardmessverfahren erfasst werden kann. Generell sind die Informationen über die ozeanographischen Oberflächenströmungen für vielschichtige Nutzergruppen von Interesse. Man denke an Modellierung, hydrodynamische Studien (Durst 2006), Navigation, Seeverkehr, Naturschutz oder zum Beispiel Offshore-Arbeitsplätze in der Windkraftindustrie, wobei die Informationen zur Erhöhung der Sicherheit bei Einsätzen durch umfassendere und aktuellere Planungen unterstützend beitragen können. Die Messung der ozeanographischen Strömungsbedingungen umfasst daher interdisziplinäre Forschungs- und Anwendungsfelder.

7.2 Stand der Technik und Forschung

LSPIV-Messungen zeigen in verschiedenen hydrographischen Labor- und Binnenuntersuchungen zuverlässige Ergebnisse, z. B. Studien von Hochwasser führenden Flüssen und Flutbedingungen oder Untersuchungen von Austauschprozessen in Flussmündungsgebieten (Schroeder und Willert 2008; Le Coz et al. 2010; Ran et al. 2016; Bechle und Wu 2014). Allerdings wird derzeit die Forschung für Offshorestudiengebiete nicht adressiert. Beeinflusst durch raue und wechselnde Umgebungsbedingungen, dynamische Strömungsgeschwindigkeiten, wechselnde Wasserstände und Strömungsrichtungen sowie Wellen oder einfach durch weniger gute Zugänglichkeit, so stellt die maritime Domäne im Vergleich zu Binnengebieten eine Reihe von anspruchsvollen und neuen Randbedingungen dar.

7.2.1 Grundlagen LSPIV Messverfahren

Die LSPIV-Technologie (Fujita et al. 1998) basiert auf der Analyse von optischen Fernerkundungsinformationen in räumlich-zeitlichen Dimensionen (Abbildung 7.1). Vereinfacht veranschaulicht werden durch einen optisch abbildenden Sensor, z. B.

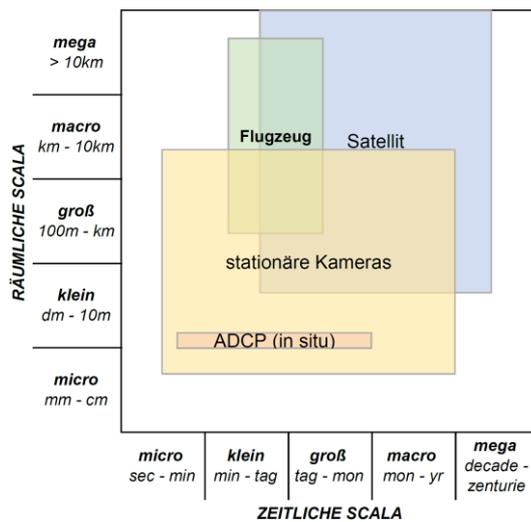


Abbildung 7.1: Räumliche Abdeckung und zeitliche Auflösung / Einsatzzeitraum potentieller Trägerplattformen für optische Messensysteme sowie in situ Referenzmesssysteme zur Beobachtung von Meeressoberflächenströmungen. Nach Angaben von (Fischer-Stabel 2005), S:82

einer Videokamera, bewegte Muster (Tracer) von Bild zu Bild einer Bilderserie identifiziert und die Verschiebung des Musters entlang von x und y Koordinaten der Bildmatrix analysiert. Die Segmentierung der gesamten Bildmatrix in kleinere Abfragebereiche ermöglicht es Geschwindigkeitsvektoren innerhalb dieser Abfragebereiche und somit über komplette Messfelder abzuleiten. Durch die Zuordnung einer realen Weltdistanz des Kamerasichtbereichs zu den Kamerapixeln, sowie der verstrichenen Zeit zwischen zwei aufgenommenen Bildern, wird die Verschiebung eines Musters von Pixel / Bildsequenz zu räumlichen Koordinaten pro Zeiteinheit übertragen, z. B. (m/s) (Schroeder und Willert 2008). In der Regel werden bei aktuellen Studien mindestens vier feste Kontrollpunkte innerhalb einer beobachteten Szene verwendet, um reale Weltdistanzkoordinaten dem Kamerasichtbereich zuordnen zu können. Und bei der folgenden Bildanalyse werden in den meisten Fällen die vom Kamerahersteller spezifizierte Bildwiederholrate als gegebene Zeitdifferenz zwischen zwei Bildern (Frames) angenommen.

7.2.2 Grundlagen ADCP-Messverfahren

Üblicherweise werden in situ Messungen zur Beobachtung von Wasserströmungen mit Acoustic Doppler Current Profilern (ADCP) realisiert. Abhängig von der jeweiligen Aufgabenstellung können ADCP's stationär eingesetzt werden, um zeitlich hoch aufgelöste Messdaten zu erhalten, als auch mobil eingesetzt werden (Transekte entlang eines Studiengebiets) um räumlich aufgelöste Messdaten zu erhalten, gezeigt in Abbildung 7.2, links. Die Messtechnik zur Erfassung der vertikal aufgelösten Geschwindigkeitsverteilung in der Wassersäule basiert auf Zeitsignalmessung mittels

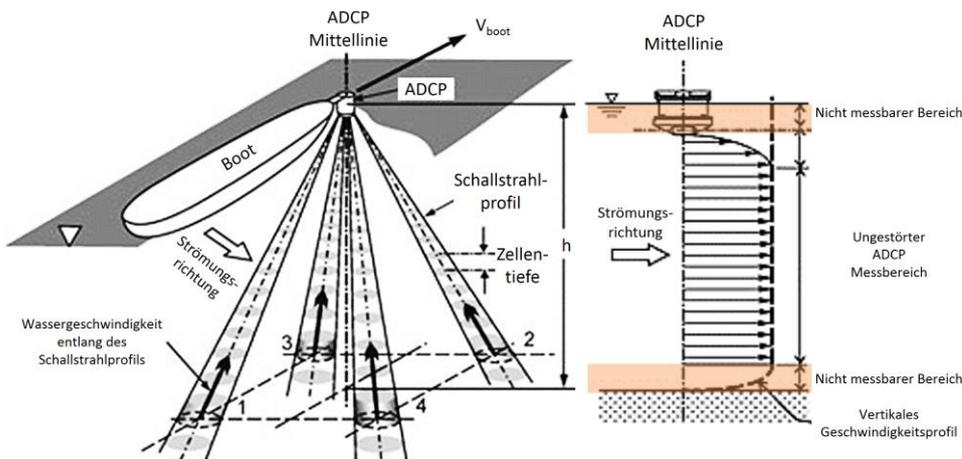


Abbildung 7.2: Funktionsprinzip eines Acoustic Doppler Current Profilers (Teledyne RDI ADCP-Konfiguration). Links: vom schiffsgetragenen Messsystem ausgehende divergente Schallstrahlprofile. Rechts: Strömungsprofil als Messdatenausgabe, farblich markiert, nicht messbare Bereiche in der Nähe der Meeresoberfläche sowie in der Nähe des Meeresbodens, adaptiert nach (Muste et al. 2008)

berührungsloser Frequenz (Doppler) Verschiebung von Schallimpulsechos von im Wasser treibenden Partikeln. Dabei wird vorausgesetzt, dass sich die Partikel mit der gleichen Geschwindigkeit wie das umgebende Fluid bewegen. Auf diese Weise wird ein horizontales Geschwindigkeitsprofil (Betrag und Richtung der Geschwindigkeit) für separate Tiefenintervalle (Zellentiefe) entlang der Wassersäule berechnet, dargestellt in Abbildung 7.2, rechts. Typischerweise ist eine Kombination von bis zu vier, im dreidimensionalen Raum divergent orientierte, Schallstrahlprofilen in modernen ADCP-Sensorköpfen implementiert. Wobei jedes Strahlpaar für die Geschwindigkeitskomponenten in z. B. Ost- / West- sowie Nord- / Südrichtung verrechnet werden. Verschiedene Designs sind kommerziell verfügbar und eine detaillierte Beschreibung der Funktion und des Betriebs wird z. B. präsentiert von RDI Instruments "Principles of Operation" (Teledyne RD Instruments 2011).

7.3 Einschränkungen von in situ Messverfahren

Während in situ Messungen von Meeresströmungen mittels ADCP-Messsystemen qualitativ hochwertige und vertikal aufgelöste Informationen über die horizontale Strömungsdynamik liefern, ist diese Messtechnik in ihrer Leistungsfähigkeit jedoch eingeschränkt. Aufgrund von sprunghaft inhomogener Dichteverteilung des Schallausbreitungsmediums (Wasser) ergeben sich Rückstreuungsstörungen des akustischen Messsignals insbesondere im Bereich der oberen Luft/Wasser-

Grenzflächenschicht (für Seebodeninstallation, nach oben ausgerichtet) sowie am Übergangsbereich Wasser / Boden (bei Schiffsinstallation, nach unten ausgerichtet). Weiterhin erfordern schiffsseitige Installationen eine minimale Eintauchtiefe des ADCP Sensorkopfes (Joseph 2014) und liefern damit keine oder unzuverlässige Daten für oberflächennahe Strömungsbedingungen, wie in Abbildung 7.2, rechts sowie in Abbildung 7.3 dargestellt. Weiterhin beschränken sich schiffsseitig eingesetzte Systeme auf ein maximale, von der vertikalen abweichende, Auslenkung (welleninduzierte Schiffsbewegung) von $\pm 15^\circ$ Nick- und Rollneigungswinkel, um zuverlässige Daten zu erhalten (RD Instruments 2005). Für flache Gewässer wie sie in Küstengebieten vorliegen bedeutet dies, dass bis zu 10 % der oberen Wassersäule nicht erfasst werden oder in den Datensätzen verworfen werden müssen, wie auch in jüngsten und anderen Studien beobachtet, (Schulz et al. 2016; Muste et al. 2008). Trotz dieser Einschränkungen ist die Messung von Meeresströmungen durch ADCPs ein etabliertes Messverfahren nach Stand der Technik, um hochauflösende Informationen der Strömungsbedingungen im maritimen Bereich zu erhalten. Die Datenfusion von vertikal aufgelösten in situ-Strömungsprofilen mit einer komplementären horizontalen Oberflächenströmung an der Wasseroberfläche, könnte diese „Oberflächenlücke“ reduzieren, wenn die unterschiedlichen Messdaten in einem räumlich-zeitlichen Kontext erhoben werden (Pearlman et al. 2014).

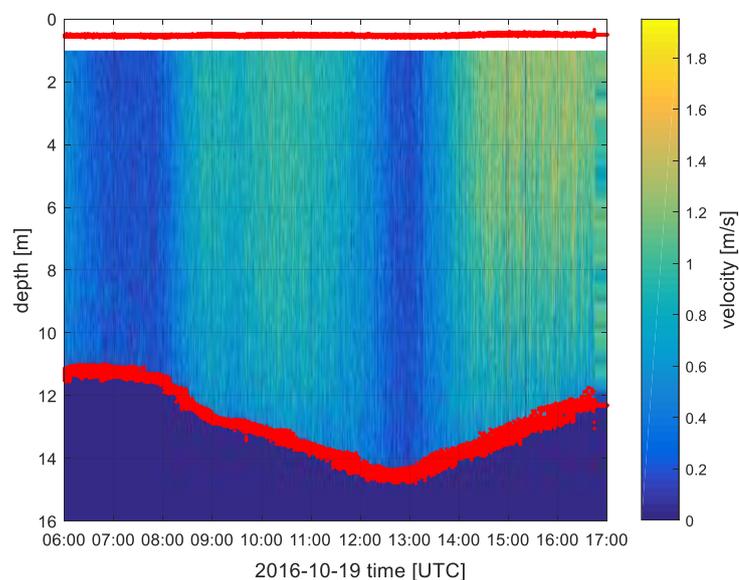


Abbildung 7.3: Vertikales Zeit-Strömungsprofil über einen Tidenzyklus, parallel zu LSPIV-Messungen aufgenommen, mit einem Schiffsgetragenen, nach unten gerichteten ADCP, rote Linien markieren nicht messbare Bereiche in der Nähe der Meeresoberfläche sowie in der Nähe des Meeresboden

Wie eingangs beschrieben bietet sich die optische Fernerkundungstechnologie LSPIV an um, mittels natürlicher vorkommender Tracer unter natürlichen Lichtverhältnissen, quantitativ und qualitativ horizontale Strömungen zu vermessen. Bis dato ist diese Technologie jedoch noch unerprobt für den offshore Einsatz im maritimen Bereich und Bedarf der Entwicklung und Tests unter realen Einsatzbedingungen. Während die Messmethode räumlich wie auch zeitliche Informationen einer beobachteten Szene zur Verfügung stellt, besteht größeres Interesse an zeitlich hochauflösenden und kontinuierlichen Messdaten, welche für eine Analyse von Gezeitendynamiken sowie Langzeitbeobachtungen geeignet sind.

Im Weiteren sollen durch die Nutzung des Testfeldes für die optische Strömungsmessung folgende Fragen beantwortet werden:

- Wie können Videodaten erhoben und verarbeitet werden, die für die LSPIV-Analyse in maritimen Offshoreregionen geeignet sind?
- Gibt es Umwelteffekte, die das LSPIV-Ergebnis beeinflussen und wenn ja in welchem Umfang?
- Stimmen LSPIV-Fernerkundungsdaten mit in situ Beobachtungen überein?

7.4 Studiengebiet und Testfeldausstattung

7.4.1 Studiengebiet

Als generisches Offshore-Studiengebiet dient eine Seegatt (Otzumer Balje) zwischen den Inseln Langeoog und Spiekeroog in der südlichen Nordsee (Deutschland). Beide Inseln gehören zu dem vorgelagerten Rückseitenwatt der ostfriesischen Inseln mit flachen Wassertiefen bis zu 20 m. Seit Herbst 2002 ist an dieser Stelle ($53^{\circ}45.016'N$, $007^{\circ}40.266'E$) eine Dauermessstation (TSS) als Beobachtungsplattform für hydrographische- und marine Umweltparameter etabliert (Reuter et al. 2009), veranschaulicht in Abbildung 7.4, oben. Die Lage zwischen den Inseln bildet einen natürlichen Strömungskanal aus, der starke halb-tägliche Gezeitenzyklen mit ca. 2,7 m Tidenhub ausgesetzt ist (Holinde et al. 2015). Durch die Gezeiten entwickeln sich dort u. a. hohe Strömungsgeschwindigkeiten von bis zu 2 m/s. Folgende Datensätze wurden am 19. Oktober 2016 zwischen 6:00 Uhr und 17:00 Uhr UTC erhoben. Dieser Zeitraum wurde aufgrund geeigneter Wasserstände zur Tageslichtzeit, sowie Umgebungsbedingungen mit mäßigen Windgeschwindigkeiten gewählt.

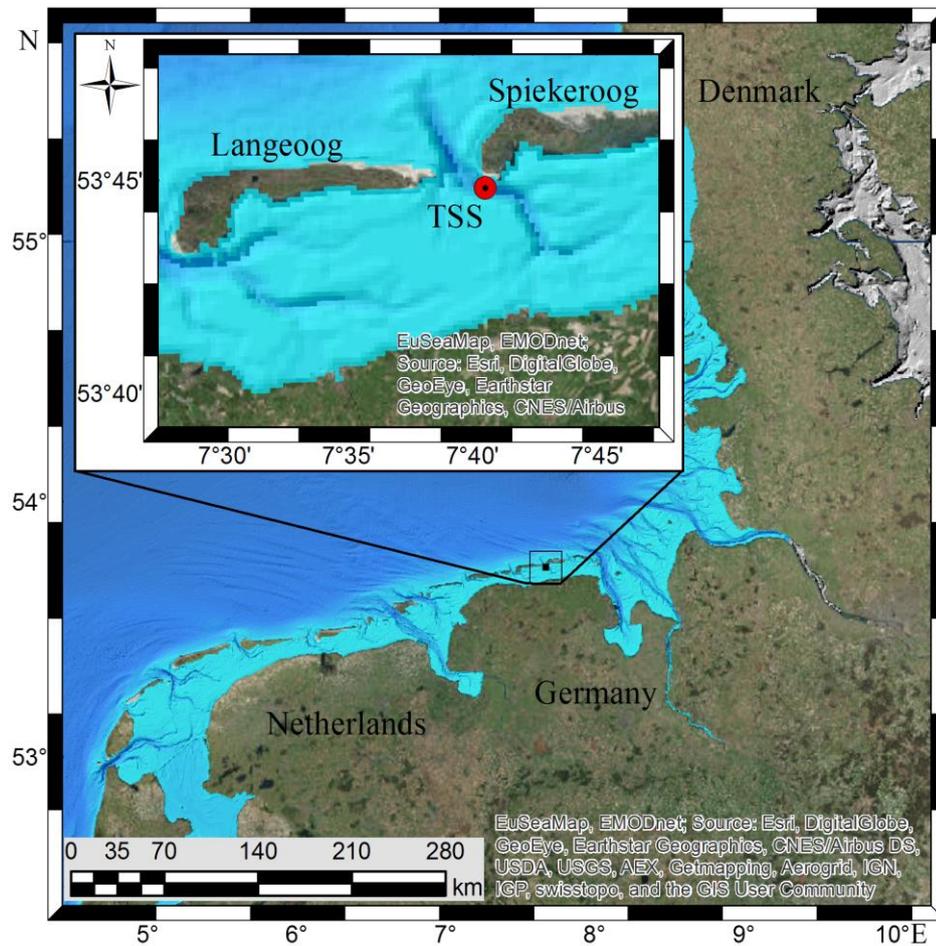


Abbildung 7.4: Geographische Lage und Position des Studiengebietes sowie der Dauermessstation Spiekeroog (roter Punkt) im Rückseitenwatt der vorgelagerten ostfriesischen Inseln, südlichen Nordsee (oben). Luftbildaufnahme des natürlichen Strömungskanals mit TSS (schwarzer Pfeil) vor der Insel Spiekeroog bei Niedrigwasser (unten)

7.4.2 Testfeldausstattung

Auch für die Entwicklung, Erprobung und Validierung neuer optischer Fernerkundungsmessverfahren bietet sich hierfür das entwickelte Testfeldsystem an. Im Gegensatz zu den vorherigen Studien wird in dieser Studie nur ein separates Sensorsystem verwendet, da keine verteilte Beobachtungsstrategie über mehrere Sensorsystemknoten erforderlich ist. Neben der allgemeinen Verwaltung der Sensoren und der kontinuierlichen Aufzeichnung von Videodaten sowie entsprechenden Metadaten für jedes Bild, ermöglicht das Testfeldsystem auch die Fernsteuerung von offshorestationierten Clients über eine LTE-Verbindung. Für den aufgezeigten Anwendungsfall stellt dies eine erhebliche Arbeitserleichterung, Zeitersparnis und Kontrollmöglichkeit dar, weil keine vor Ort Präsenz in der Studienumgebung notwendig ist. Für die Bildgewinnung wurde die zuvor in Kapitel 5.1.1 beschriebene, kalibrierte visuelle Industriekamera (2048×2048 Pixel, D_x , D_y), 8 bit Auflösung mit einem 6-mm-Objektiv eingesetzt (acA2040-gc, Basler und LM6HC, Kowa Optimed). Die Aufzeichnungsfrequenz betrug 20 Bilder pro Sekunde.

Um eine geeignete Beobachtungsposition mit einheitlicher Beleuchtungssituation der Meeresoberfläche ohne Schattenwurf durch bauliche Gegebenheiten der TSS zu erhalten (Abbildung 7.5, rechts), wurde eine Simulation des TSS-Schattenverlaufs für ein festes Datum an der Observationsposition mit einem 3D-CAD-Modell durchgeführt (variable Zeit-Solar-Verfügbarkeitsstudie, Solidworks Prof. ver. 2015, Dassault Systèmes SolidWorks Corp., USA). Die Simulationsergebnisse sind in Abbildung 7.5 (links) dargestellt und zeigen ein optimales Sichtfeld (FOV), südwestlich in Nadir-Anordnung ausgerichtet. Dem entsprechend, wurden die optischen Sensoren an einem stabilisierten Ausleger 9,9 m (Δh) über dem mittleren

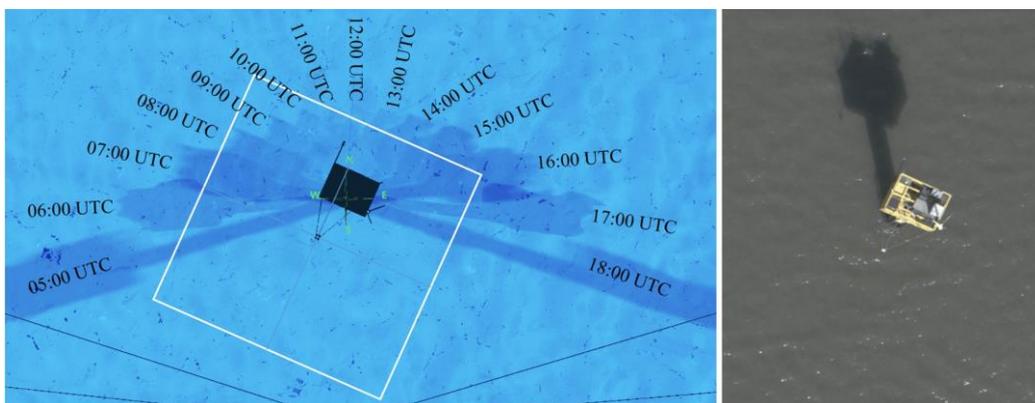


Abbildung 7.5: Simulationsergebnisse von stündlich auftretenden Schattenwurf der TSS (links), Sonnenpfad am 2016-05-18 (Zenit- und Azimutwinkel). Ein weißer Rahmen veranschaulicht den Südwest orientierten Kamerasichtbereich für die Fernerkundungsbeobachtungen der Meeresoberfläche. Luftbildaufnahme der Zeitserienstation und deren Schattenwurf (rechts), 2017-03-22, 12:00 UTC

Meeresspiegel (MSL) positioniert und auf die Meeresoberfläche ausgerichtet (Abbildung 7.6). Die Datenaufzeichnung erfolgte kontinuierlich mittels Testfeld Admin-Clients, gezeigt in Abbildung 7.7. Weiterhin wurde in Kombination zur VIS- Kamera, eine Infrarotkamera (Mikrobolometer) eingesetzt, mit der zusätzlich Temperaturinformation der Meeresoberfläche (verweis auf Kap.6.4.4 Stationäre Umweltbeobachtung) sowie marine Oberflächenfilme betrachtet werden können¹³ (Garbe et al. 2004; Gade et al. 2006; Soloviev und Roger Lukas 2014).

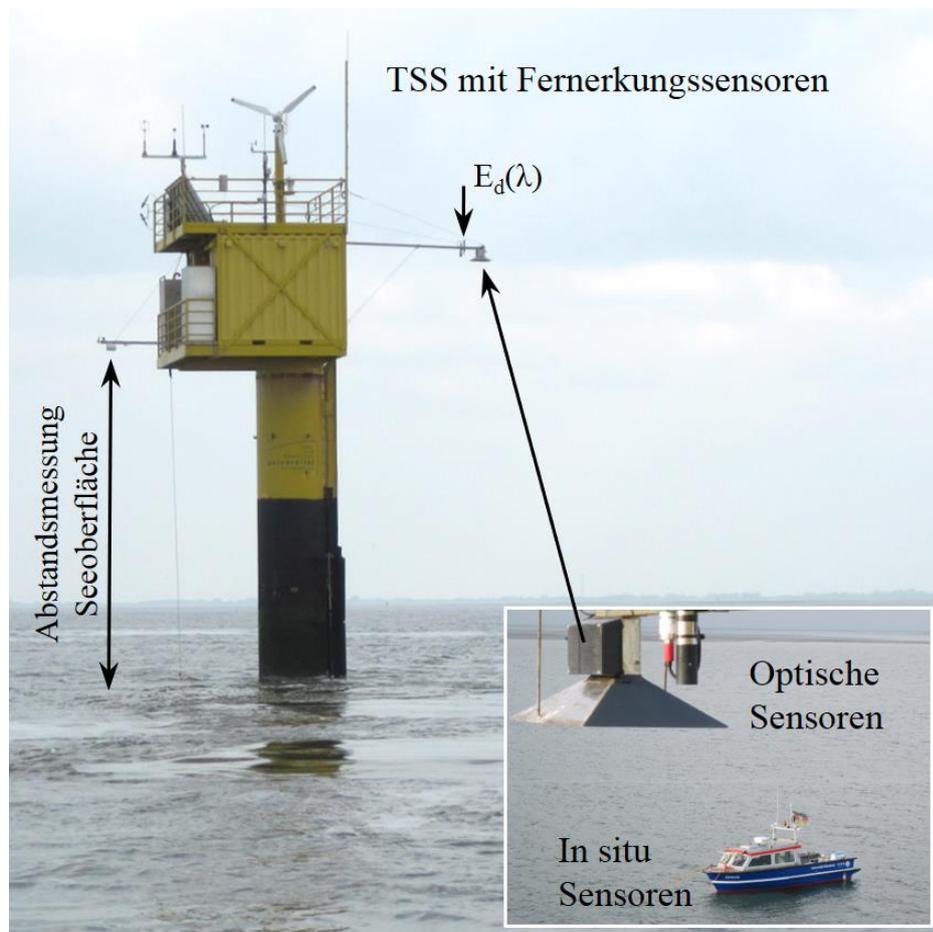


Abbildung 7.6: Systemaufbau des Testfeldes sowie der in situ Referenzmesssysteme im offshore Studiengebiet. Zeitserienstation mit optischen Sensoren am oberen rechten Ausleger und Ultraschallsensoren zur Abstandsmessung am linken Ausleger. Kleines Bild: Schiffsgestützte in situ Messungen mit ADCP, RHCM und CTD, verankert in unmittelbarer Nähe des LSPIV-Observationsbereiches

¹³ Unter Berücksichtigung der Ausrichtung dieses Kapitels sowie der vorliegenden Arbeit werden diese Anwendungspunkte sowie Messdaten und Auswertungen der Infrarotkamera nicht weiter betrachtet, es soll der Vollständigkeit halber jedoch darauf hingewiesen werden.

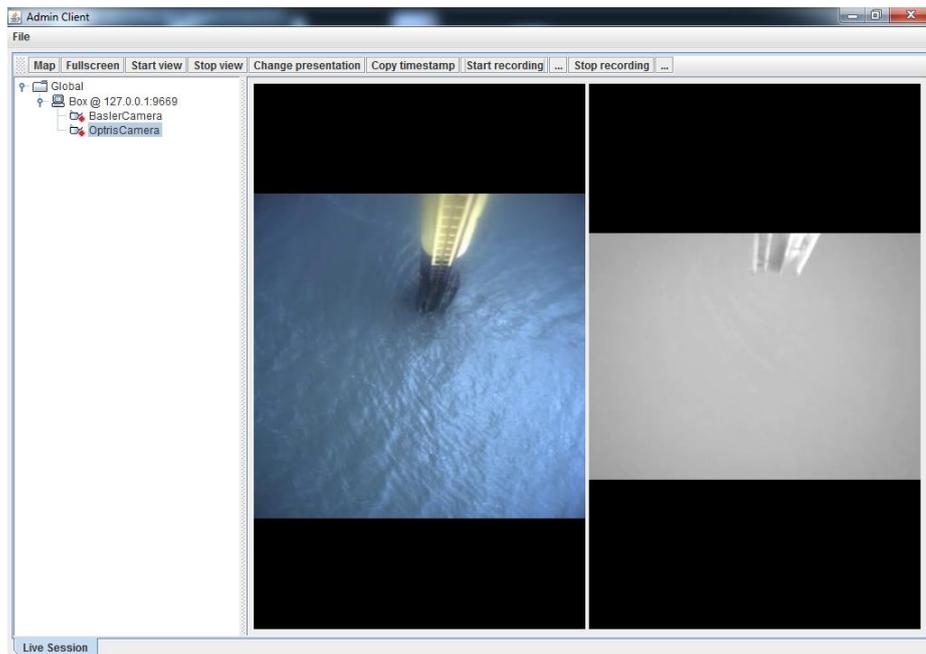


Abbildung 7.7: Offshore stationiertes Testfeld, grafische Oberfläche des Admin-Clients zur kontinuierlichen Aufzeichnung von Videodaten der Meerwasser-Oberfläche (links visuell, rechts infrarot) sowie Metadaten auf der Dauermessstation Spiekeroog

Um eine Orthorektifikation der Kamerapixel in Weltkoordinaten durchführen zu können, fehlen bei Offshore-Beobachtungen oft feste Maßstabreferenzen oder Kontrollpunkte im Bild. Eine Zuordnung der realen Weltstanzkalibrierung über mehrere vermessene Fixpunkte im Sichtfeld der Kamera, wie diese üblicherweise bei anderen Binnenstudien durchgeführt wird, ist nicht möglich. Um dies zu umgehen, kann der erfasste Sichtbereich (FOV) der Kamera sowie die resultierende Größe eines abbildenden Pixels auf der Wasseroberfläche ($IFOV_{dx,dy}$) berechnet werden. Unter der Berücksichtigung vom zeiteninduzierten alternierenden Abstand (Δh) der Kamera zur Meeresoberfläche (MSL) (vermessen mittels kalibrierten Ultraschallsensoren, LOG_aLevel, General Acoustic, Germany, Abbildung 7.8, oben), sowie mit bekannten Kameraobjektivöffnungswinkel (AOF) von 90° ist folgende Berechnung anwendbar.

Die Orthorektifikation für den realen Weltabstand pro Kamerapixel folgt:

$$IFOV_{dx,dy} = \frac{2 \tan\left(\frac{AOF}{2}\right) MSL - (-\Delta h)}{D_x, D_y} \quad (7.1)$$

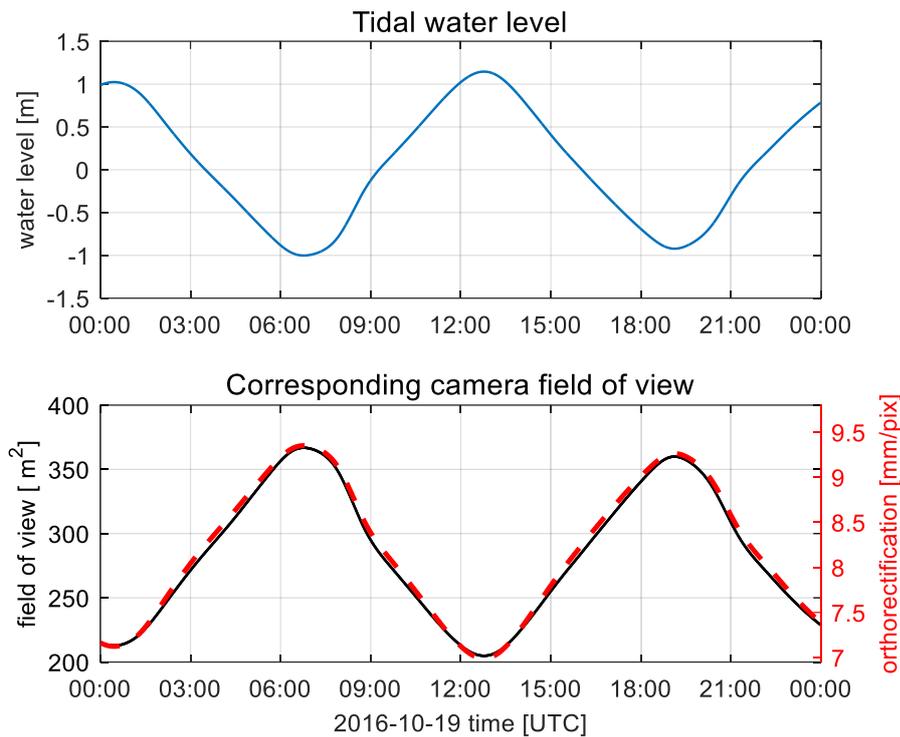


Abbildung 7.8: Gezeitenabhängiger Wasserspiegel (MSL) mit halbtägigen Gezeitenzyklen und Tidenhub im Bereich von ca. 2,2 m (oben), abgeleitet von TSS-Messungen mittels Ultraschallsensor. Berechneter entsprechender Kamera FOV (unten, linke Achse) sowie orthorektifizierte reale Weltentfernung (IFOV) pro Kamerapixel d_x , d_y , (unten, rechte Achse)

In diesem Studienfall ergibt sich hiermit ein alternierender FOV von etwa 200 - 370 m², dargestellt in Abbildung 7.8 unten (linke Achse). Entsprechend beträgt der horizontale $IFOV_{dx}$ 7 - 9,2 mm/Pixel für die Kamera-Objektiv-Kombination, wie in Abbildung 7.8 unten (rechte Achse) gezeigt.

7.4.3 Erhebung von Referenzmessdaten

Durchgehende in situ Beobachtungen für die Referenzdatenerhebung wurden ausgehend von einem verankerten Forschungsboot etwa 70 m südlich neben der TSS durchgeführt, dargestellt in Abbildung 7.6, kleines Bild. Dieser Platz wurde gewählt, da dieser an der tiefsten Stelle des natürlichen Strömungskanals platziert ist und vergleichbare Strömungsverhältnisse wie bei der TSS aufweist (Grashorn et al. 2015; Stanev et al. 2009), welche geeignet sind um Referenzmessdaten für die LSPIV-Validierung zu erhalten.

142 Nutzung und Evaluation des Testfeldes für optische Strömungsmessung

Die Strömungsgeschwindigkeit nahe der Wasseroberfläche sowie vertikale Geschwindigkeitsprofile in Verbindung mit Tiefenprofilen für Temperatur und Salinität wurden mit folgender Systemkonfiguration gemessen:

- A) Acoustic Doppler Current Profiler - ADCP: Vertikal aufgelöste horizontale Geschwindigkeitsprofile wurde kontinuierlich von einem Forschungsboot mit einem nach unten gerichteten Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP, RDI Workhorse Sentinel, 1200 kHz, Teledyne RD Instruments, USA) aufgezeichnet. Zeitliche Auflösung ($\Delta t_{ADCP} = 1,04$ s), vertikale Auflösung ($\Delta z_{ADCP} = 0,25$ m entlang 85 Zellen) für einen Geschwindigkeitsbereich von ± 5 m/s. Der nach unten gerichtete Instrumentenaufbau resultiert in eine Eintauchtiefe des Sensorkopfes von -0,5 m unterhalb der Meeresoberfläche und somit auf eine erste auswertbare Tiefe in -0,65 m (erster mittlerer Zellenbereich). Der Rohdatenexport und die Qualitätsbearbeitung für einen zulässigen Nick- und Roll-Neigungsfilter wurden mit der Software WinADCP ver.1.14 (Teledyne RD Instruments) durchgeführt. Die Kursausrichtung (Heading) wurde durch eine DGPS-Positionierung (Receiver SPS 461, Trimble, USA) korrigiert.
- B) Rod held current meter - RHCM: Die Geschwindigkeit in -0,1 m Wassertiefe wurde mit einem kalibrierten Flügelradsensor aufgenommen. (Plessey-Messflügel, Geschwindigkeitsmessbereich von 0,1 - 10 m/s, Messfehler ± 5 % für 0,1 - 0,499 m/s und ± 1 % für 0,5 - 10 m/s). Die Messdaten wurden in einem Intervall von einer Sekunde aufgenommen und resultieren aus einem gleitenden Mittelwert der Strömungsgeschwindigkeitsmessdaten von 5 Sekunden. Das RHCM (Typ 445515, Hydrobios, Deutschland) wurde vor dem verankerten Forschungsboot montiert, vorwärts gerichtet entgegen der jeweilig vorherrschenden Strömungsrichtung (das am Bug verankerte Boot richtet sich automatisch entgegen der Strömungsrichtung aus). Auf diese Weise werden nachteilige Wellen- und Bootsneigungseffekte auf den Flügelradsensor minimiert um die vorliegenden Oberflächenströmungen ungestört zu vermessen.

- C) Leitfähigkeit und Temperatur - CTD: Geringe barokline Dichtegradienten können eine vertikale Zirkulationsbeschleunigung in der Wassersäule erzeugen, was zu einem zweischichtigen Fluss bei Niedrig- und Hochwasserbedingungen führen kann (Burchard et al. 2008). Um einen möglichen Einfluss auf die vorherrschenden Strömungsverhältnisse zu ermitteln, wurden Tiefenprofile von Salinitäts- und Temperaturwerten aufgenommen. Diese wurden stündlich im Profil, sowie kontinuierlich in 10 cm Wassertiefe, mit einer hohen zeitlichen Auflösung ($\Delta t_{CTD} = 0,5$ s) an der Position des Forschungsbootes, mit einem kalibrierten CTD Sensor (CTD 48M Multi Parameter Memory Probe, Sea & Sun Technology GmbH, Deutschland) gemessen. Die Salinitätsdaten wurden mit der Software SST-STA (Standard Data Acquisition ver 1.83, Sea & Sun Technology) unter Anwendung von UNESCO PSS-78, Typ S Routinen (IOC) verarbeitet. Die Druck zu Tiefen-Umwandlung wurde nach der Formel von Fofonoff und Millard Jr 1983, S. 25–27 berechnet. Für den Beobachtungszeitraum lagen homogene Salinitäts- und Temperaturverhältnisse innerhalb der Wassersäule vor und eine vertikale Zirkulationsbeschleunigung wird daher bei der folgenden LSPIV-Bewertung nicht berücksichtigt.
- D) Umgebungsbedingungen: Um die LSPIV-Ergebnisse im Kontext von Umweltbedingungen (Lichtverfügbarkeit, Wind) der beobachteten Szene beurteilen zu können, wurde ein kalibriertes RAMSES-ACC-hyperspektral Messgerät (TriOS, Deutschland) zur Ermittlung der eingehenden Sonnenbestrahlungsstärke $E_d(\lambda)$ in der Nähe der Kamera positioniert, dargestellt in Abbildung 7.6. Die Messergebnisse resultieren aus dem Mittelwert E_d -Mittel des sichtbaren Wellenlängenspektrums von 400 - 700 nm, mit 5 Minuten Aufnahmeintervall. Der entsprechend zugehörige Zenitwinkel θ_s wurde unter Verwendung des Solarpositionsalgorithmus von Reda und Andreas berechnet. Die Windgeschwindigkeit sowie Windrichtung wurde 12 m über dem mittleren Meeresspiegel durch Windsensoren (METEROLOGIE, Lambrecht, Deutschland) in 1- minütigen Intervallen überwacht.

7.5 Entwicklung eines LSPIV Messverfahrens

Bei der Einrichtung eines LSPIV-Messsystems sowie der Datenanalyse sollten einige Anforderungen berücksichtigt werden, um zuverlässige Ergebnisse mit minimalen Unsicherheiten zu erzielen. Es gibt in diesem Zusammenhang systembasierte systematische Fehlerquellen, beginnend von der Kameraeinrichtung, der Rohdatenerfassung und der Datenvorverarbeitung, sowie zufällige Fehler die durch Umgebungsbedingungen wie inhomogene oder wechselnde Beleuchtung, Tracerdichte usw. verursacht werden. Eine Auflistung dazu ist im Anhang G: Unsicherheiten LSPIV Verfahren, S: 180 aufgeführt. Für eine umfassende Betrachtung von möglichen LSPIV-Unsicherheiten und deren potentiellen Auswirkungen auf die Messergebnisse wird an dieser Stelle auf Y. Kim's ausführliche Studie hingewiesen (Kim 2006). Mindestens stabilisierte Videosensoren sowie präzise Orthorektifikation und Zeittrennung zwischen den Frames sollten sorgfältig betrachtet werden, da diese Variablen mit direkten Einfluss auf die Ergebnisse der berechneten Geschwindigkeit einwirken. Aufgrund der Gezeitenzyklen sind große dynamische Bereiche der Fließgeschwindigkeit sowie der Strömungsrichtung (bis zu ± 2 m/s) bei der LSPIV-Verarbeitung zusätzlich zu berücksichtigen.

Im Folgenden wird die Entwicklung sowie die Videodatenanalyse eines LSPIV-Messverfahrens für die Offshore-Beobachtung von horizontalen Strömungsgeschwindigkeiten und Strömungsrichtungen vorgestellt. Abbildung 7.9 präsentiert das Konzept des entwickelten LSPIV Messverfahrens für Langzeitbeobachtungen im Flussdiagramm. Hierin sind die aufeinander aufbauenden Verarbeitungsschritte der LSPIV-Analyse dargestellt. Diese beginnen mit der Sensoradministration und kontinuierlichen Datenerfassung von Videodaten sowie Metadaten durch das Testfeld. Weiterhin werden Daten für die Orthorektifizierung und Umweltparameter erhoben. Anschließend folgt eine automatisierte LSPIV-Analyse durch die Eingabe von Video- und Metadaten in eine entwickelte LSPIV-Toolbox. Die Daten werden vorverarbeitet und es folgt die eigentliche Bildauswertung für die Berechnung der Strömungsverhältnisse. Darauf folgend wird eine qualitätsorientierte Nachbearbeitung dieser Ergebnisse durch unterschiedliche Daten-Filtermechanismen sichergestellt. Zum Schluss stehen mit diesem Auswerteverfahren zeitaufgelöste Messdaten der horizontalen Strömungsbedingungen für unterschiedliche Anwendungszwecke zur Verfügung. Die einzelnen Schritte werden im Folgenden detailliert beschrieben.

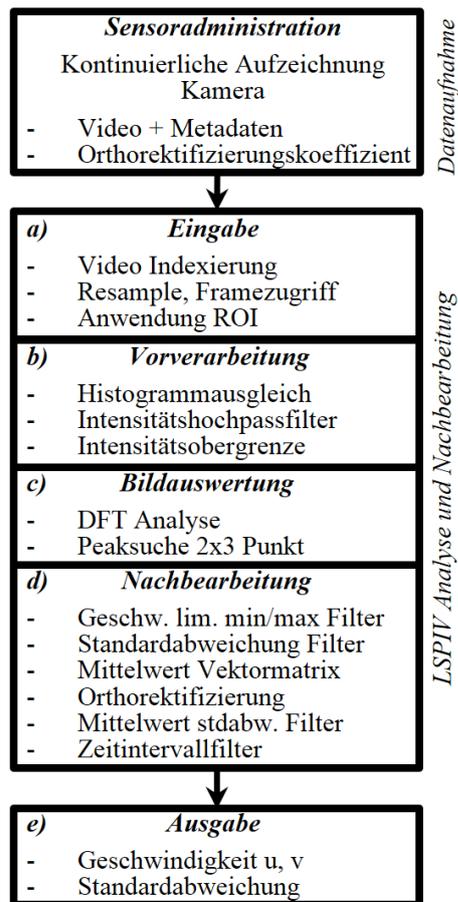


Abbildung 7.9: Ablauf im Flussdiagramm des entwickelten LSPIV Messverfahrens, geeignet für Langzeitbeobachtungen, beginnend mit der Datenaufnahme, qualitätsorientierter LSPIV-Analyse und Nachbearbeitung sowie Datenausgabe

Die Aufzeichnung von Videodaten einschließlich Metadaten (Zeitstempel, Qualitätsinformationen) und Orthorektifizierungskoeffizient wurden, wie im vorigen Absatz beschrieben, durch das Testfeld realisiert. Alle Berechnungen wurden in Matlab Release 2015a (MathWorks, Inc.) realisiert und berücksichtigen umfangreiche Verarbeitungsschritte wie sie in komplementären LSPIV-Analyse-Tools für Binnenstudien wie Fudaa oder RIVeR (Le Coz et al. 2014; Patalano und Garcia 2016) implementiert wurden. Das vorgestellte System basiert auf angepassten PIVlab ver.1.41 Matlab Funktionen (Thielicke und Stamhuis 2014) mit folgenden Verarbeitungsschritten:

- a) *Dateneingabe*: In diesem Schritt werden die aufgezeichneten Videodaten und Metadaten (UNIX-Millisekundenzeitstempel) eingelesen und indiziert. Die Eingabe unterstützt mehrere Videoformate und Standards von z. B. VIS-Kameras (visuell) oder NIR-Kameras (nahes Infrarot), Ultra High Definition sowie radiometrische Videodaten unter Verwendung von FFmpeg (<https://ffmpeg.org/>) Videocodecs. Die Abtastrate zwischen Videoframe A_1 zu B_1 sowie das Abtastintervall zwischen Frame A_1 und $A_{2...N}$ (dargestellt in Abbildung 7.10) kann nach Bedarf für den jeweiligen Kamerasischtbereich, die erwarteten Geschwindigkeitsgrößen sowie den abzudeckenden Dynamikbereich frei eingestellt werden (resample Funktionalität).

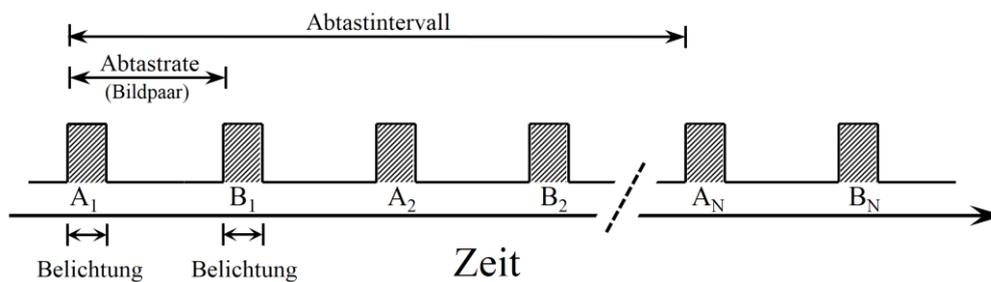


Abbildung 7.10: Systematik für Abtastintervall und Abtastrate zwischen mehreren Videoframes während der Indexierung zur weiteren LSPIV-Analyse

Wie in anderen Studien (Bechle und Wu 2014) vorgeschlagen wird im Folgenden ein Abtastintervall von 1 s sowie 20 Hz Abtastrate (20 fps, 50 Millisekunden) zwischen zwei aufeinanderfolgenden Frames A_1 zu B_1 verwendet. Des Weiteren können Bereiche von Interesse (ROI's) im Bild festgelegt werden. Dies ist oft notwendig um Teilausschnitte der beobachteten Szene (z. B. die mitunter von Interesse liegenden, geeigneten Strömungsbedingungen) für weitere Bearbeitungsschritte zuzuordnen.

Für die vorgestellte Studie wurde einen ROI abseits des zweifachen Durchmessers (1,6 m) des TSS-Pfahls festgelegt (Abbildung 7.11, kleines Bild) um geeignete, vom Messpfahl ungestörte, freie Oberflächenströmungsbedingungen zu betrachten (Stern 1975; Baykal et al. 2015).

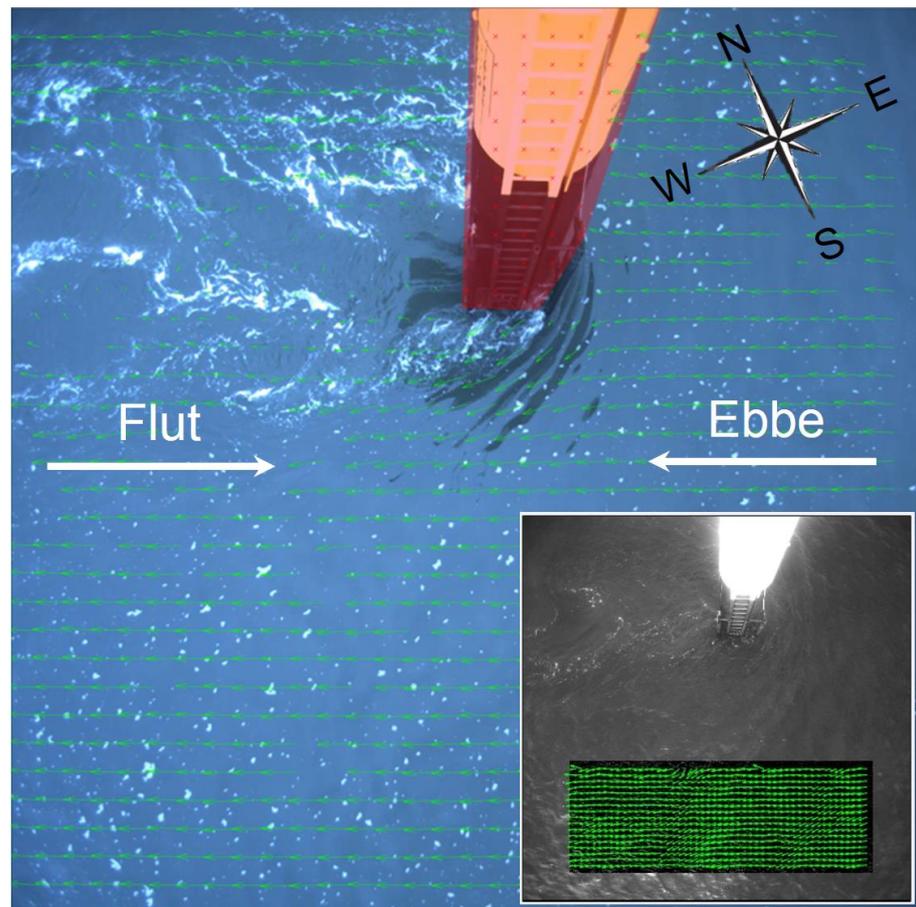


Abbildung 7.11: Sichtbereich der visuellen Kamera und Meeresoberflächenbedingungen bei der TSS mit natürlichen Schaumtracern sowie Wellentracer (ersichtlich im kleinen Bild). Das gesamte Videobild ist mit einem LSPIV-Vektorfeld kombiniert. Kleines Bild: ROI für ungestörte Strömungsverhältnisse der Meeresoberfläche der Szene mit LSPIV-Vektorfeld für die Langzeitbeobachtung

- b) *Vorverarbeitung*: Dieser Schritt ist erforderlich um geeignete Tracersignaturen im Bild von der Umgebungssignatur zu differenzieren. Während bei Binnenstudien teilweise künstliche Tracer in Form von hellen, treibenden Materialien verwendet werden, ist diese Methode für Offshore- Studien und Langzeitbeobachtungen jedoch nicht Praktikabel. Für Offshore-Studienplätze sind kontinuierliche und konstant vorkommende natürliche Tracersignaturen jedoch selten. Insgesamt konnten für die ozeanographische LSPIV-Bildanalyse zwei verschiedene geeignete Tracersignaturen (Muster) im sichtbaren Bereich (400 - 700 nm) identifiziert werden:

Natürlicher Schaum: Natürlicher Schaum entsteht vorwiegend durch Welleneinwirkung, dort wo Luft in Form von Blasen in die Wassersäule eindringt und sich als Schaum an der Oberfläche manifestiert. Dessen Stabilität reicht von wenigen Sekunden bis zu Tagen und hängt von physischen und chemischen Umgebungsbedingungen wie Temperatur, Niederschlag, Tensiden oder Algenblüten ab (Soloviev und Roger Lukas 2014; Jodeau et al. 2008; Monahan und O’Muircheartaigh 1986; Monahan 1971). Der Schaum treibt mit der Meeresoberflächengeschwindigkeit und wird zusätzlich durch Windeinwirkung geschert (Grachev et al. 2003). Windinduzierte Drift / Scherung der Oberflächengeschwindigkeit kann bei moderaten Windgeschwindigkeiten korrigiert werden (Bechle und Wu 2014). Schaum tritt oft weißlich bis hell-bräunlich im Aussehen auf und zeigt daher hohe Intensitätsspitzen mit schmalen Peaks als Signatur im Graustufenbild für diese Studie und Umgebungsbeleuchtungssituation, dargestellt in Abbildung 7.12, oben. Dessen Graustufenwerte treten im Bereich von 215 - 255 (Abbildung 7.12, unten) für Szenen in dem ROI auf, wie in Abbildung 7.11, dargestellt. Im Durchschnitt nehmen Schaumtracer in der aufgezeigten Studie eine Fläche von 9×9 Pixeln im visuellen Bild ein.

Wellensignaturen: Gleichmaßen können Signaturen, welche aus kleinen Wellenerhebungen resultieren (hauptsächlich Oberflächenrippel) als natürliche Tracer verwendet werden. Auch wenn der Intensitäts- und Graustufenwertebereich (110 - 120) im Vergleich zu den Schaum-Signalen kleiner ist, dargestellt in Abbildung 7.12, oben und unten. Diese Signaturen sind weitestgehend in der ozeanographischen Umgebung verfügbar und für die LSPIV-Analyse bei ausreichender Beleuchtung zugänglich, dargestellt in Abbildung 7.11, kleines Bild. Windscher-Stress-Effekte auf diese Art von Tracer sind niedriger als auf natürlich treibenden Schaum.

Die Bilder (ROI) können durch routinemäßige Bildfilter konditioniert werden um geeignete Tracersignaturen weiter gegenüber der Umgebung herauszustellen und damit das RAW-Bild (Rohdatenformat) für die weitere LSPIV-Analyse vorzubereiten. Hierzu wird ein *Adaptiver Histogramm-Ausgleich* (CLAHE) in kleinen Bildbereichen angewendet um inhomogene lokale Beleuchtungssituationen anzugleichen. Hierdurch werden die am

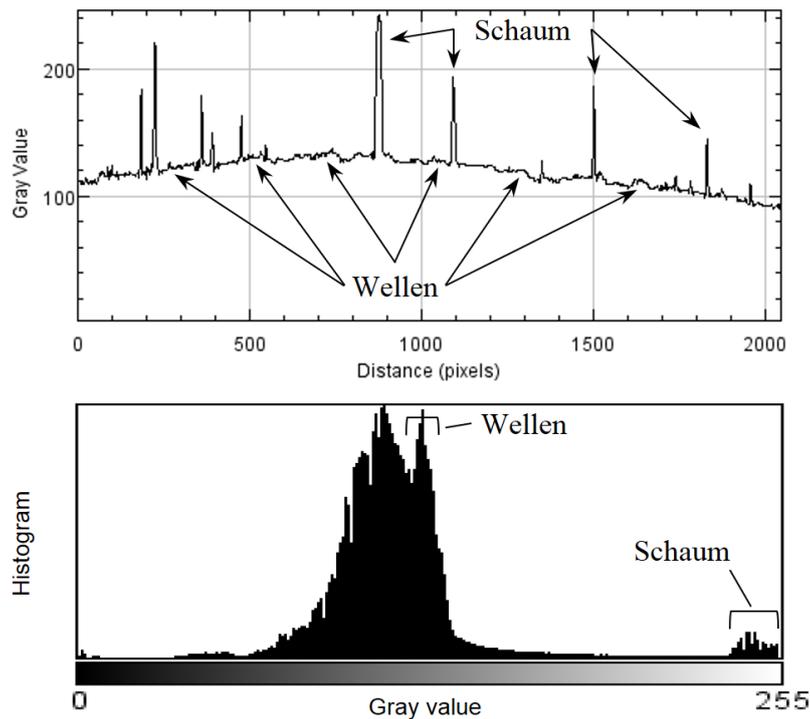


Abbildung 7.12: Beispiel für verschiedene Meeresoberflächen-Signaturen im sichtbaren Wellenlängenbereich für eine Kamerazeile, wie sie für LSPIV-Vorverarbeitungsfiler von 8-bit-Graustufenbilder des ROI in Abbildung 7.11 auftreten (oben). Die Graustufenwerte zeigen Schaum mit schmalbandigen, hohen Intensitätssignaturen sowie Wellenstrukturen als kleine breitbandige Intensitätssignaturen. Histogramm des identischen Bildes und dessen Graustufenwerteverteilung für Wellenstrukturen und Schaum (unten)

häufigsten vorkommenden (meist frequenten) Graustufenwerte im Histogramm auf einen vollen Bereich (0 - 255, in 8-bit-Bildern) ausgedehnt. Weiterhin können durch einen *Intensitäts-Hochpassfilter* niedrige Frequenzen (Grauwerte von z. B. inhomogener Beleuchtung) entfernt, sowie die hohen Frequenzen von Tracern beibehalten werden. Eine *Intensitätsanpassung* bewirkt darauffolgend das, ausgehend von einer unteren Intensitätsgrenze, alle im Histogramm vorkommenden Grauwertintensitäten auf ein identisches Intensitätsmaximum eingestellt werden. Dieser Bildbearbeitungsschritt ist nützlich um geringe Intensitäten von z. B. Wellensignaturen in dem Bild weiter herauszuarbeiten Für diese Studie und den vorherrschenden Umgebungsbedingungen wurden geeignete Vorverarbeitungseinstellungen mit einer CLAHE-Fenstergröße von 128 Pixeln, einer Hochpassfiltergröße von 20 sowie aktiver Intensitätsanpassung ermittelt.

- c) *Bildauswertung*: Die Bildauswertung berechnet den (Verschiebungs-) Vektor von Signaturen zwischen zwei Bildpaaren. Dafür werden Frame A_1 und B_1 in ein gleichmäßiges Gitter mit kleinen Abfragebereichen $A_{(i, j)}$, $B_{(i, j)}$ aufgeteilt. Die Kreuzkorrelationsmatrix $C_{(m, n)}$ wird anschließend mit *diskreter Fourier-Transformation* (DFT) für jeden dieser Abfragebereiche mit mehreren Durchgängen für partielle Überschneidungen von $B_{(i, j)}$ zu $A_{(i, j)}$ berechnet (Thielicke und Stamhuis 2014):

$$C(m, n) = \sum_i \sum_j A(i, j) B(i - m, j - n) \quad (7.2)$$

Darauffolgend wird die Tracerverschiebung (in Pixel) mit Subpixel-Präzision durch *Peak-Finding* (Integer-Intensitätsverteilung mit der größten statistischen Eindeutigkeit) für die jeweiligen unterteilten Bildabfragebereiche (der jeweiligen Kreuzkorrelationsmatrix) berechnet. Durch Zweimaligen *3-Punkt-Gauß-Fit* für, einmal horizontale und vertikale Achsen, wird die Verschiebung der Tracersignaturen eines korrelierenden Abfragebereichs (der zusammengehörigen betrachteten Videoframes A_1 und B_1) somit als Vektor (Betrag und Richtung der Tracer-Verschiebung) verbunden. Um ein vollständiges (Strömungs-) Vektorfeld für die beobachtete Bildszene oder dem ROI zu erhalten (Abbildung 7.11), wird dieser Prozess auf alle kleinen Bildabfragebereiche angewendet.

An dieser Stelle soll der Vollständigkeit halber auch auf alternative Kreuzkorrelationsalgorithmen mittels direkter Kreuzkorrelation DCC hingewiesen werden. Die Korrelation wird dabei für die räumliche Dimension berechnet und zeichnet sich durch verlustfreie Informationsverarbeitung mit niedrigem Hintergrundrauschen aus. Ein Nachteil dabei sind jedoch erhöhte Rechenzeiten gegenüber dem DFT-Verfahren um etwa Faktor 10 (Huang et al. 1997). Weiterhin berücksichtigt DCC keine ungleichmäßige Bewegung von Bildmustern / Tracersignaturen (Scherung oder Drehung unter realen Strömungsbedingungen). Somit zeichnet sich die Kreuzkorrelationsberechnung in der zeitlichen Domäne mittels der DFT Variante für eine Langzeitbeobachtung unter realen Umgebungsbedingungen sowie effektiven Berechnungszeiten aus und wurde daher in die Toolbox implementiert.

d) *Nachbearbeitung*: Da die LSPIV-Ergebnisse auf statistische Auswerteverfahren beruhen, kann die berechnete Geschwindigkeit als auch die Richtung fehlerhaft sein und müssen in der Regel nachbearbeitet werden um zuverlässige Ergebnisse zu erzielen (Kim 2006; Thielicke und Stamhuis 2014; Huang et al. 1997). Ungültige Geschwindigkeitsgrößen, welche z. B. Außerhalb der physikalisch möglichen Gesetzmäßigkeiten auftreten, können aus der Vektormatrix durch einen *Geschwindigkeitsfilter* für einen festgelegten minimalen / maximalen Schwellenbereich für horizontale (u) und vertikale (v) Komponenten durch PIVlab-Routinen entfernt werden. Weiterhin werden ungültige Vektoren durch eine Betrachtung der *Standardabweichung* (SD) innerhalb des nahen umgebenden Vektorfeldes ermittelt und herausgefiltert. Für diese Studie wurde eine lokale Ausreißererkenung und anschließende Interpolation mit Filtereinstellungen für $SD > 3$ des Median von 3×3 Nachbarschaftsvektor-Ergebnissen angewendet.

Für die Langzeitanalyse von Offshore-Oberflächengeschwindigkeiten und Strömungsrichtungen sollten, der Fragestellung entsprechend, umfassende Regionen wie Pfade oder Bereiche im Untersuchungsgebiet unterteilt werden. Hierdurch können räumliche Ergebnisse in zeitlicher Auflösung betrachtet und ausgewertet werden. Für den ROI in dem betrachteten Studiengebiet (Abbildung 7.11, kleines Bild) liegen im optimalen Fall räumlich einheitliche und somit homogene Strömungsverhältnisse vor. Daher kann für die *Vektormatrix* des gesamten Bild-ROI ein *Mittelwert* für u, v berechnet werden. Die gemittelten Ergebnisse werden durch zugehörige Zeitstempel der Testfeld-Metadaten markiert und einem, entsprechenden zu dem Zeitpunkt gültigen, *Orthorektifizierungskoeffizient* zugeordnet (Abbildung 7.8, unten). Weiterhin können Ausreißer der zeitaufgelösten LSPIV-Ergebnisse bei Überschreitung einer festgelegten Obergrenze der *Standardabweichung* von u, bzw. v herausgefiltert werden. Ein *Zeitintervallfilter* ermöglicht darüber hinaus den Ausschluss von Messergebnissen bei Überschreitung eines Schwellenwertes der Bildabtastrate. Die Division der Abtastrate (Zeitdifferenz zwischen Frame A und B) durch u, bzw. v Vektoren, sowie durch Multiplikation des jeweilig gültigen Orthorektifizierungskoeffizienten (Weltkoordinaten der Pixel in z. B. Millimeter/Pixel) wird anschließend die Geschwindigkeit (Pixel / Bildpaar) in Weltkoordinaten (m/s) berechnet. Im Fall dieser Studie wurden SD-Filter > 5 und *Zeitintervallfilter* > 50 Millisekunden verwendet.

- e) *Ausgabe:* Das Ergebnis dieser LSPIV-Analyse enthält die räumlich gemittelte horizontale- (u) und vertikale- (v) Geschwindigkeitskomponente der Bild-ROI-Geschwindigkeitsmatrix, den Betrag $|\vec{v}|$ aus gemitteltem u und v , sowie die (Strömungs-) Richtung des Vektors für jedes Abtastintervall. Bei Bedarf kann ein Hampelfilter (Matlab) für drei Iterationen auf die Zeitreihe angewendet werden. Damit werden Messwertausreißer detektiert und gefiltert, deren Median von dem der sechs benachbarten Messwerte (drei pro Seite) stark abweicht. Dies tritt beispielsweise vermehrt bei unzureichender Umgebungsbeleuchtung (im sichtbaren Spektrum) auf, wie in den folgenden Ergebnissen deutlich wird.

7.6 Ergebnisse optische Strömungsmessung

7.6.1 Meeresoberflächenströmungsgeschwindigkeit

Alle LSPIV-, RHCM- und ADCP Daten umfassen zeitenabhängige Strömungen für Niedrigwasser- als auch Hochwasserbedingungen über einen Beobachtungszeitraum von 11 Stunden, dargestellt in Abbildung 7.13. Alle Datensätze in Abbildung 7.13 wurden mit einem gleitenden Durchschnitt von 1200 Sekunden für eine bessere Darstellung geglättet. LSPIV stellt die Strömungsgeschwindigkeit $|\vec{v}|$ an der unmittelbaren Meeresoberfläche dar, RHCM repräsentiert Strömungsbedingungen der Meeresoberfläche in -0,1 m und der erste Zellenbereich (Bin) des ADCP repräsentiert die Strömungsbedingungen in -0,65 m unter der Meeresoberfläche. Zusätzlich zu den Analyseergebnissen der optischen LSPIV-Messmethode wird der Mittelwert der eingehenden Sonnenbestrahlungsstärke, E_d (400 - 700 nm) im Balkendiagramm (Abbildung 7.13, oben) dargestellt um die jeweilig vorherrschende Umgebungsbeleuchtung zu veranschaulichen. Die LSPIV-Ergebnisse zeigten ein minimales Ansprechverhalten für $|\vec{v}|$ von weniger als 0,15 m/s. Die untere Ansprechgrenze ist auf omnidirektionale Strömungsverhältnisse bei Stauwasser der Gezeiten oder multiplexte Welleneffekte bei geringen Strömungsgeschwindigkeiten zurückzuführen. Diese Effekte verursachen inhomogene Geschwindigkeitskomponenten in den Vektormatrizen mit einer hohen Standardabweichung und werden deshalb im Nachbearbeitungsanalyse-Schritt (d) gefiltert, da diese eine vorgegebene SD-Grenze überschreiten.

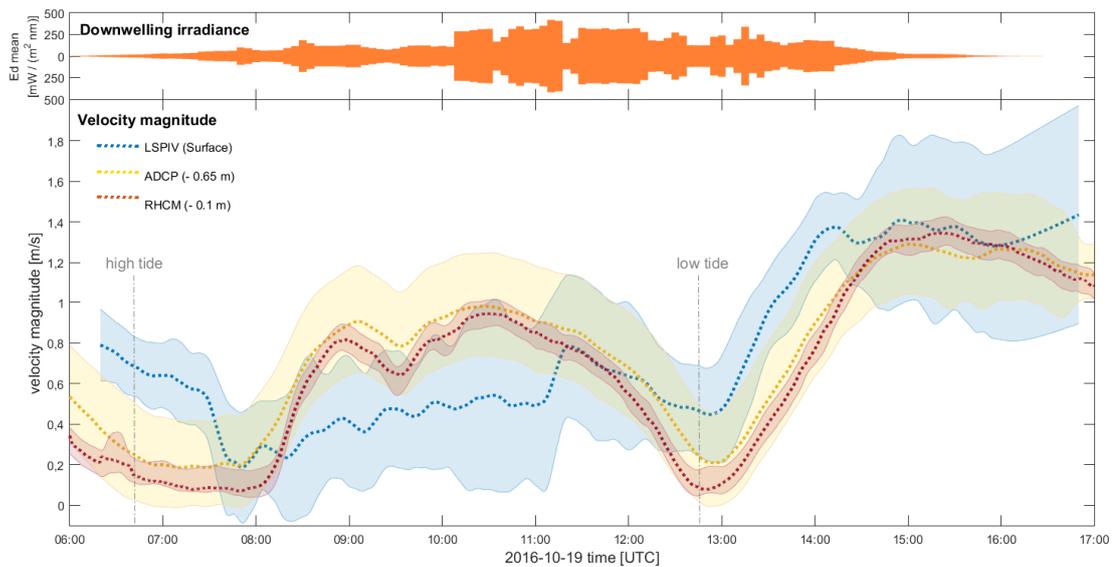


Abbildung 7.13: Strömungsgeschwindigkeits-zeitreihen (gemittelt) und Standardabweichungen, beobachtet durch LSPIV-Analyse, RHCM und ADCP in situ Sensoren. Die eingehende Sonnenbestrahlungsstärke aufgenommen an der LSPIV-Kameraposition, dargestellt durch E_d , (Mittelwert 400 - 700 nm), zeigt verfügbare Umgebungsbeleuchtung und Fluktuation im Tagesverlauf

Im Vergleich zu den RHCM Daten zeigen die LSPIV-Ergebnisse $|\vec{v}|$ Abweichungen von 6:00 bis 8:30 UTC, diese sind zurückzuführen auf eine unzureichende Verfügbarkeit sowie Vorkommensdichte von Schaumtracern. Darüber hinaus treten auch geeignete Wellentracer-Signaturen in diesem Zeitraum mit geringer Intensität auf und können nicht vollständig von der Bildvorverarbeitung bei den vorherrschenden Beleuchtungsbedingungen erfasst werden, wie durch den zugehörigen E_d Wert dargestellt. Die Vergrößerung der LSPIV-Standardabweichung ist im Weiteren bei schwachen Lichtverhältnissen (ab 14:30 UTC) offensichtlich und stellt eine nachvollziehbare Antwortfunktion für optische Sensoren dar, welche im visuellen Wellenlängenbereich empfindlich sind und somit auf eine ausreichende Umgebungsbeleuchtung angewiesen sind, um Wellensignaturen mit geringer Intensität erfassen zu können. Wohingegen geringe Licht- oder Bewölkungsbedingungen weniger signifikante nachteilige Auswirkungen auf $|\vec{v}|$ LSPIV-Analyseergebnisse zeigen wenn Schaumtracer mit hoher Graustufenintensität verfügbar sind. Von 11:20 UTC und fortlaufend, bei bewölkten Bedingungen, sind die LSPIV-Ergebnisse zuverlässig anzusehen im Vergleich zu den RHCM-Ergebnissen.

Eingehendes Sonnenlicht mit hoher Intensität sowie klare Himmelsverhältnisse induzieren potentiell Sonnenreflexionen von der Wasseroberfläche (in Form von Glanz und Glitzern) in optische Sensoren, wenn diese auf die Wasseroberfläche ausgerichtet sind (Garaba und Zielinski 2013). Visuelle-Kameras stellen in diesem Hinblick auch keine Ausnahme dar, so dass die LSPIV-Bildauswertung durch diese Reflexionen gestört wird. Dadurch ergeben sich größere Abweichungen in den Geschwindigkeitsmessungen auch wenn genügend Schaumtracer zur Verfügung stehen. Für die in Nadirsicht ausgerichtete Kamera und Beobachtungsposition in dieser Studie liegt dieser Fall von $(7:00 > 9:20 < 11:20 \text{ UTC})$ für den Sonnen- Zenit Winkel θ_s ($17^\circ \geq \varphi \leq 17^\circ$) vor (Reflexionsgrad $R_s > 60 \%$) (Soloviev und Roger Lukas 2014). Sonnenreflexionen an der Wasseroberfläche provozieren dabei ungleichförmige und gestreute Geschwindigkeitsvektoren in der Bildauswertung aus folgenden Gründen (die Zuordnungen wurden in Abbildung 7.12 eingeführt): Bei der Bildvorverarbeitung verursachen Sonnenglitzern, als auch Sonnenglanz hohe Intensitätswerte in den Kamerapixeln, so dass der adaptive Histogramm-Ausgleich (CLAHE) geringere Intensitätswerte von gültigen Wellensignalen nicht ausreichend innerhalb der Bildregionen aufwerten kann. Des Weiteren passieren die Graustufenwerte von Sonneninterferenzen den Bild-Hochpassfilter, da diese über der Filtergrenzfrequenz in dem gleichen unentbehrlichen Graustufenbereich wie Schaum- und Wellensignaturen auftreten. Im Weiteren werden aufgrund der Intensitätsanpassung während der Bildvorverarbeitung Sonneninterferenzen und Schaumtracer auf das gleiche Intensitätsniveau angehoben und können nicht weiter unterschieden werden, so dass die Bildauswertung fehlerhafte Ergebnisse liefert.

Die Ergebnisse vom ADCP-Messsystem und RHCM-Messsystem zeigten insgesamt eine gute Korrelation ($R^2 = 0,98$) für den betrachteten Zeitraum. Die Geschwindigkeit des RHCM-Messsystems (nahe der Oberfläche) liegt im Mittel $0,15 \text{ m/s}$ niedriger als die ermittelte Geschwindigkeit des ADCP-Systems in $-0,65 \text{ m}$ Wassertiefe. Dabei ist zu beachten das die RHCM-Messungen durch welleninduzierte Orbitalbewegungen im Wasserkörper beeinflusst werden können und nur gemittelte Geschwindigkeiten durch das Plessey-Instrument gemessen werden. Infolge dessen scheint die Präzision der RHCM-Messwerte auch höher, als jene der LSPIV- oder ADCP-Messungen, wie durch die zugehörige geringere Standardabweichung in Abbildung 7.13 angegeben.

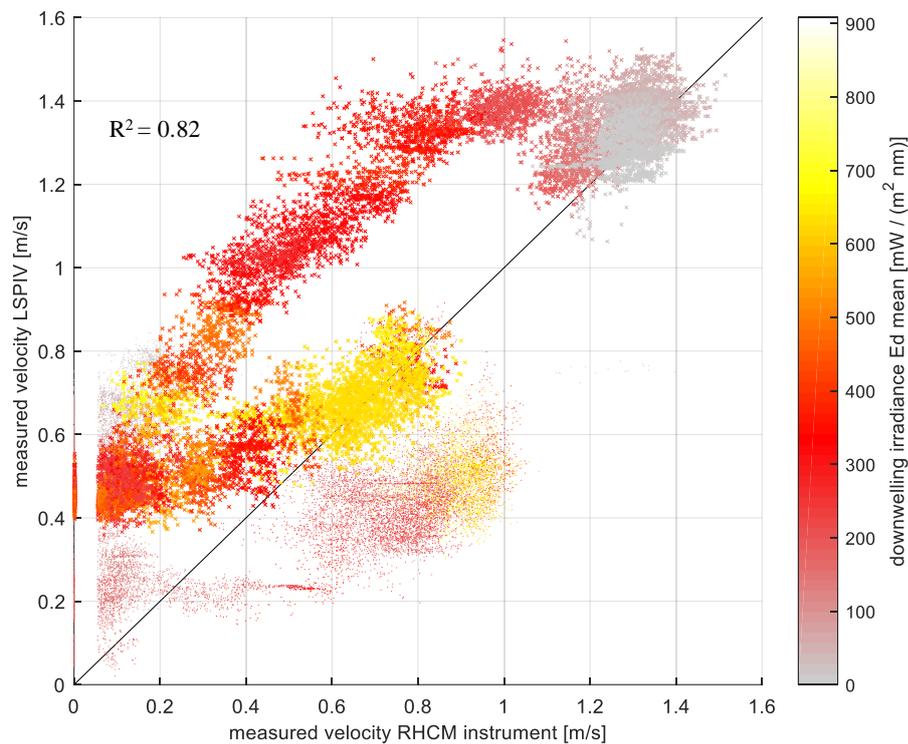


Abbildung 7.14: Vergleich von RHCM gemessener und korrelierende LSPIV analysierter Geschwindigkeiten. Die im 45° verlaufende schwarze Linie repräsentiert identische RHCM und LSPIV Daten. Kleine Punkte repräsentieren den Zeitbereich bis 11:20 UTC, große Punkte darauffolgender Zeitbereich. Die farbcodierten LSPIV Daten zeigen die vorliegende eingehende Bestrahlungsstärke E_d der Umgebung

Abbildung 7.14 zeigt die Korrelation von RHCM und LSPIV ermittelten Geschwindigkeiten für etwa 40.000 simultan aufgenommene Messdaten. Die vorherrschende Umgebungsbeleuchtung ist farbcodiert von Grau für geringe Umgebungsbeleuchtung zu Gelb mit hoher Umgebungsbeleuchtung. Zur Unterscheidung von Daten mit unzureichender Tracerverfügbarkeit sowie Sonneninterferenzen (bis 11:20 UTC des Beobachtungszeitraums) sind diese durch kleinere Punkte dargestellt.

Während bewölkten Himmelsbedingungen und ohne direkte Sonneneinstrahlung zeigen die Geschwindigkeitsergebnisse des LSPIV-Messverfahrens im Vergleich zu den RHCM-Ergebnissen zuverlässige Werte ($R^2 = 0,82$). Der Vergleich beider Messsysteme zeigt weiterhin eine ausgeprägte Hysteresekurve. Positiv auf der

fallenden sowie steigenden Flanke, was auf eine Scherspannungskomponente welche auf die Meeresoberfläche (bzw. Tracersignaturen) einwirkt, hindeuten könnte. Die Schergeschwindigkeit ist in der Nähe der Meeresoberfläche während der Beschleunigungs- und Verzögerungsphasen des Wasserkörpers (durch Gezeiten) am höchsten. Diese Beobachtung steht auch im Einklang mit anderen Studienergebnissen (Schulz et al. 2016).

7.6.2 Meeresoberflächenströmungsrichtung

Die LSPIV-Analyseergebnisse ermöglichen gute, schnelle und stätige Messungen der Meeresoberflächenströmungsrichtungen, selbst bei inkonsistenter Tracerdichte, schwachen Umgebungslichtverhältnissen oder Sonneninterferenzen, dargestellt in Abbildung 7.15, unten. Parallel zu den fernerkundungs- und in situ- Messungen wird die Windgeschwindigkeit sowie Windrichtung in Abbildung 7.15, oben dargestellt. Diese zeigen mäßige bis ruhige Bedingungen während der Anwendungsstudie.

Der Vergleich der Ergebnisse von LSPIV-Strömungsrichtungen mit in situ gemessener Strömungsrichtung, (gemessen mit ADCP, Mittelwert der ersten 5 Zellen) zeigt für die gesamte Beobachtungsperiode eine gute Korrelation ($R^2 = 0,83$), präsentiert in Abbildung 7.16. Die stätigen LSPIV-Daten werden durch Nachbearbeitungsfilter für inkonsistente lokale Ausreißer in der Vektormatrix erreicht, sowie durch die Mittelwertbildung der auftretenden Vektorrichtungen über das gesamte (ROI-) Vektorfeld. Hingegen zeigen die Daten des ADCP-Systems weniger zuverlässige Messergebnisse bei Stauwasser oder niedrigen Strömungsgeschwindigkeiten, was auf eine ungleichmäßig gerichtete Schallrückstreuung der im Wasser befindlichen Partikel zurückzuführen ist. Beispielhaft wird dies deutlich in Abbildung 7.15 unten, vor Eintreten der Hochwasserbedingungen. Die hochauflösenden LSPIV-Richtungsmessungen ermöglichen die Betrachtung von Windscherungskomponenten (Grachev et al. 2003), welche auf den oberen Wasserkörper einwirken. Diese erschienen als kleine, fluktuant auftretende Peaks in Abbildung 7.15, unten (z. B. kurz nach Hochwasser). Die ermittelte Hauptströmungsrichtung ist topographiegeführt und verläuft zwischen den Inseln an der Messposition bei auflaufendem Wasser von West ($\sim 284^\circ$) nach Ost ($\sim 104^\circ$) und bei ablaufendem Wasser entsprechend entgegengesetzt.

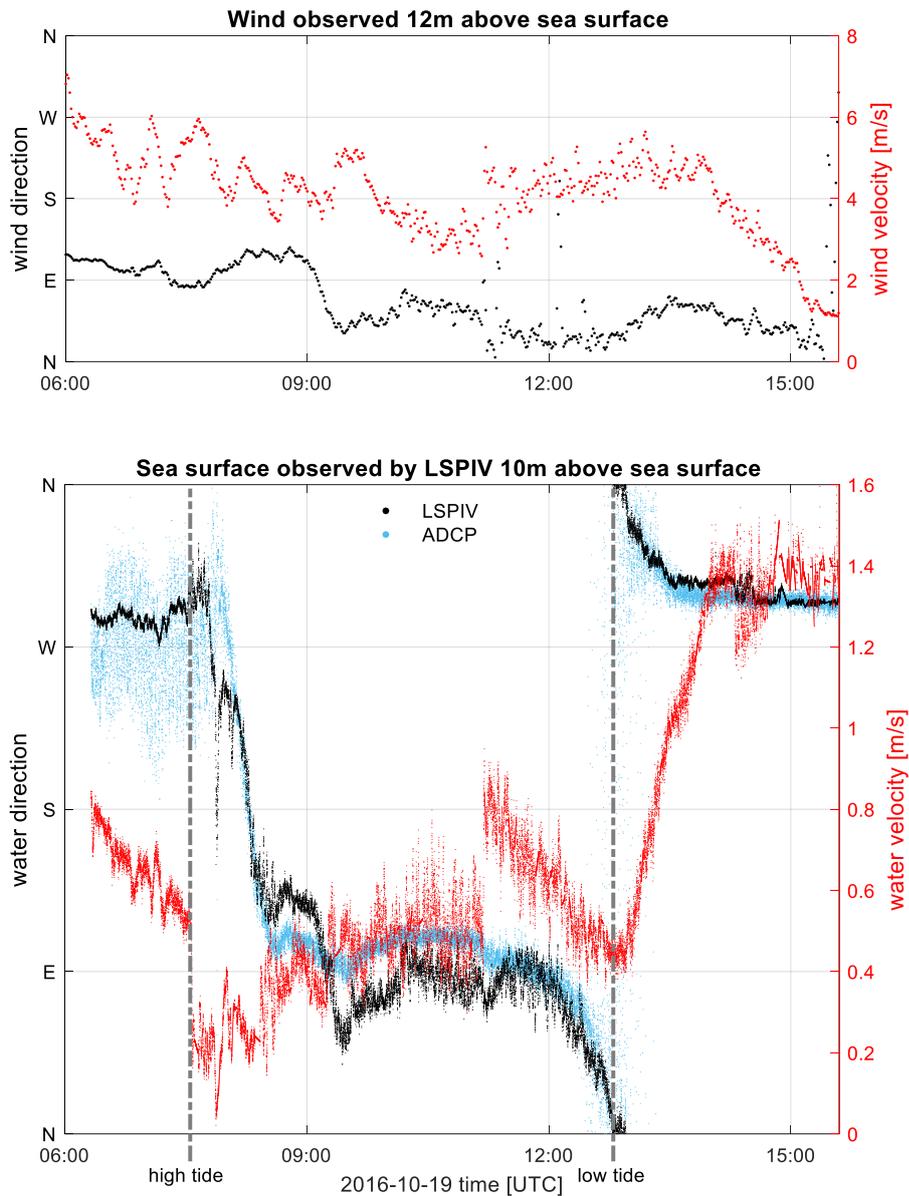


Abbildung 7.15: Windgeschwindigkeit und Windrichtung beobachtet an der TSS 12 m über NN der Meeresoberfläche (oben), zeigen mäßige bis ruhige Bedingungen während der fernerkundungs- und in situ- Messungen. Unten: Strömungsgeschwindigkeit (rot) sowie Strömungsrichtung (schwarz) an der Meeresoberfläche mittels LSPIV-Analyse. ADCP in situ Daten der Strömungsrichtung für den Mittelwert der ersten 5 Zellen (blau)

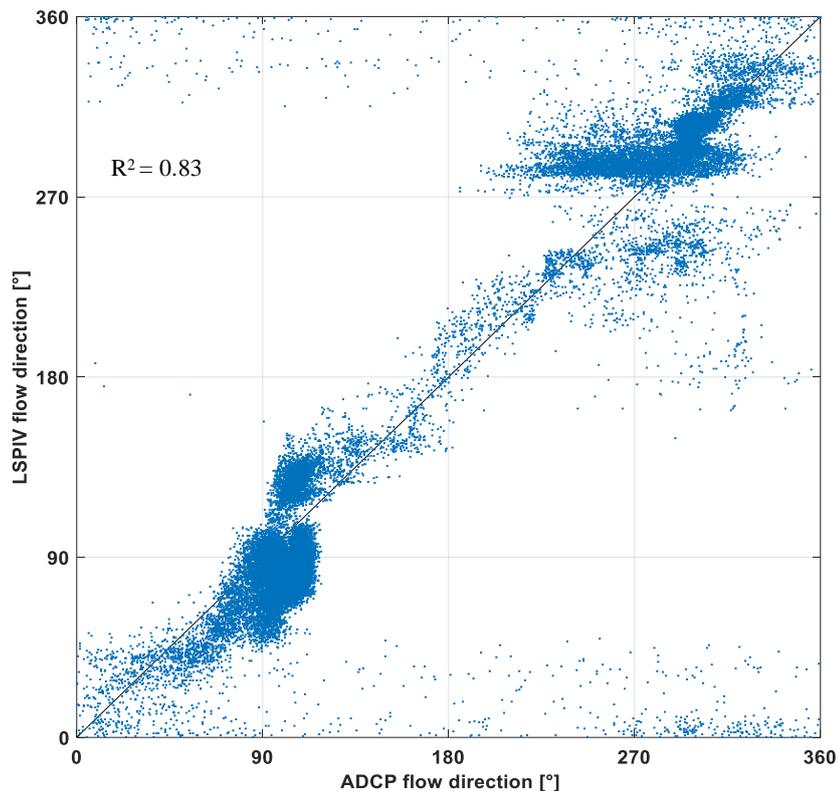


Abbildung 7.16: Gegenüberstellung von Strömungsrichtungen von ADCP in situ Daten (für die ersten 5 Bins) und LSPIV-Daten zeigten eine gute Korrelation. Die vorwiegende Strömungsrichtung für auflaufendes Wasser ($\sim 284^\circ$) und ablaufendes Wasser ($\sim 104^\circ$) wird durch eine hohe Datendichte erkenntlich

7.7 Diskussion optische Strömungsmessung, Testfeldevaluation

Übliche in situ Sensorsysteme sind begrenzt in der Lage ausreichende Informationen der Meeresoberflächenströmungsbedingungen bereitzustellen. LSPIV-Messverfahren bieten distinktiv eine Ergänzung für stationäre in situ Messung an um diese Lücke zu schließen. Dieses Fernerkundungsmessverfahren ist weiterhin auch für Standorte geeignet die als sonst schwer zugänglich angesehen werden (Fujita et al. 1998), und in einigen Situationen ist LSPIV die einzige Messalternative um kontinuierlich Meeresoberflächenströmungen mit einer hohen zeitlichen Auflösung zu erforschen. LSPIV ist zu einem vielversprechenden Messwerkzeug in der Hydrologie geworden und wurde kontinuierlich durch die Symbiose von Bildverarbeitungstechnologie, Ingenieurwesen und Informatik entwickelt. Doch im maritimen Bereich sind

Anwendungen und Studien mit dieser Technik selten. Darüber hinaus fehlt es bei anderen Studien oft an kontinuierlich und hochfrequent erfassten LSPIV und in situ Daten zum Vergleich und der Validierung der Messergebnisse.

Die Zielsetzung, eine ergänzende alternative Gesamtmesstrategie zu schaffen, wurde durch das Testfeld für optische Sensoren durch umfassende Anwendungsmöglichkeiten zur Entwicklung und Validierung von Werkzeugen im maritimen Bereich (wie z. B. LSPIV-Techniken) erreichbar. Durch diesen Ansatz konnten langfristige Beobachtungen mit hoher zeitlicher Auflösung von einer offshorestationierten Dauermessstation erfolgreich durchgeführt werden. Kontinuierliche Aufzeichnungen von Video- sowie Metainformationen, als auch komplementäre in situ Daten und die Aufzeichnung von Umgebungsbedingungen konnten für die Qualitätsbewertungen des entwickelten offshore LSPIV-Messverfahrens herangezogen werden. Der Vergleich von etwa 40.000 gleichzeitig aufgenommenen Messungen innerhalb eines Gezeitenzyklus stellte eine hohe zeitliche Auflösung dar und somit eine bedeutende Leistungssteigerung gegenüber anderen LSPIV-Anwendungsstudien.

Eine Orthorektifikation mit festen Referenzpunkten in der Umgebung, wie dies normalerweise bei üblichen LSPIV-Ansätzen zur Kalibrierung des Kamerasichtfelds verwendet wird, kann bei einer Offshoreanwendung nicht durchgeführt werden. Deshalb wurde eine Lösung entwickelt, welche die gezeitenabhängigen alternierenden Abstände der optischen Sensoren zur Meeresoberfläche korrigiert und eine zuverlässige Orthorektifizierung des Kamerasichtfeldes gewährleistet.

Die LSPIV-Technik liefert im Vergleich zu in situ Beobachtungen vernünftige und nachvollziehbare Ergebnisse für ein optisches Fernerkundungssystem, mit nutzbaren Geschwindigkeitsinformationen für gezeitenabhängige Strömungsbedingungen. Die kamerabasierten Messungen im sichtbaren Lichtspektrum erfordern eine ausreichende Umgebungsbeleuchtung, jedoch keine direkte Sonneneinstrahlung auf die beobachtete Region und sind bei bewölkten Himmelsbedingungen optimal anwendbar. Die Messgenauigkeit kann durch Tracerverfügbarkeit, unzureichende Beleuchtung oder ungünstige Bedingungen, die auf die freie Wasseroberfläche einwirken, wie z. B. Sonnenglitzern, beeinflusst werden (Garaba und Zielinski 2013). Ungleichmäßige natürliche Beleuchtung und unzureichende Tracerverfügbarkeit stellten sich als die relevantesten Fehlerquellen für diese ozeanographische Studie, in Kontrast zu anderen Binnenstudien (Kim 2006), heraus. Messungen von Meeresoberflächen-

Strömungsrichtungen können mit Rücksicht auf Windeffekte (Herrling und Winter 2015) mit dem LSPIV-Verfahren gut umgesetzt werden. Durchgehende in situ Beobachtungen mittels ADCP zeigen, dass beide Messverfahren in guter Übereinstimmung sind.

Um die Gesamtleistung der Technik zu verbessern orientiert sich die laufende Forschung (Flora; Zhang et al. 2013) auch auf die Erweiterung der LSPIV-Messmöglichkeiten in weiteren (multispektralen) Wellenlängenbereichen. Infrarotkameras, welche im 7,5 - 13 μm Band sensitiv reagieren, sind unabhängig von der Umgebungsbeleuchtung und können Videodaten auch während der Nachtzeit bereitstellen. Sonneninterferenzen sind für Infrarotsensoren weniger einschränkend und natürliche Tracer können um IR-Emissionssignaturen von der Meeresoberfläche, beispielsweise Temperaturgradienten oder treibende Oberflächenfilme, erweitert werden. In diesem Zusammenhang bieten aktuelle Studienergebnisse auch interessante Anwendungsmöglichkeiten für die Beobachtung der Strömungsdynamik von treibendem Packeis in Wasserstraßen (Keve 2016).

Die Anwendbarkeit und Sicherstellung der Leistungsfähigkeit der LSPIV-Messmethode erfordert angemessene Bildaufnahme- und Bildanalysetools, insbesondere für Feldstudien unter der Nutzung natürlich vorkommender Tracer und Umweltinterferenzen. Das in dieser Arbeit behandelte Testfeld und die entwickelte LSPIV-Messmethode zeigen hierfür gute Ergebnisse. Darüber hinaus konnten durch das Testfeld und die Anwendungsstudie weitere Informationen für zukünftige Ausbaufähigkeiten gewonnen werden. Weiteres Entwicklungspotential bieten neue Vorverarbeitungsalgorithmen zur „Bildverbesserung“ in Verbindung mit Polarisationsfiltern sowie die Erweiterung des Bilddynamikbereichs > 8 bit für visuelle optische Sensoren um Sonneninterferenzen, welche als die größte Fehlerquelle anzusehen ist, zu minimieren. Darüber hinaus wäre eine wartungsarme, mobile, integrierte und autonome Echtzeit-Systemlösung mit einem attraktiven Preis-Leistungs-Verhältnis im Vergleich zu in situ-Systemen (NOAA; Dramais et al. 2011) denkbar und ein weiterer Fortschritt für binnen- und ozeanographische- Feldstudien. Als weitere Anwendung wäre beispielsweise die Ausstattung von offshore Windparks zu nennen. Optische Sensoren und LSPIV-Auswertung wären einfach nachträglich zu implementieren und würden an jeder Windenergieanlage eine Langzeitbeobachtung der Strömungsverhältnisse ermöglichen. Durch die Verknüpfung der Daten wären hiermit Informationen aus großflächigen Bereichen permanent für F&E zugänglich.

7.8 Zusammenfassung optische Strömungsmessung

Die wichtigsten Ergebnisse dieser Offshore-LSPIV-Anwendungsstudie zur Testfeldevaluation:

- LSPIV kann verwendet werden um Strömungsbedingungen der Meeresoberfläche in ozeanographischen Umgebungen zu bestimmen.
- Das Testfeld für optische Sensoren liefert die benötigten Sensorinformationen und Metainformationen zur Erfassung und qualitätsorientierten Verarbeitung von Videodaten die für die LSPIV-Analyse geeignet sind.
- Auch entfernte und schwierig zu Erreichende offshore Studiengebiete können mit dem Testfeld ausgestattet werden.
- Eine qualitätsorientierte Nachbearbeitung ist notwendig um aussagekräftige Ergebnisse für LSPIV - Strömungsgeschwindigkeiten zu erhalten.
- Zeitlich hochauflösende LSPIV-Beobachtungen sind notwendig um ausreichende Daten für eine konsistente in situ-Validierung der Ergebnisse bereitzustellen.
- Gezeitenabhängige Geschwindigkeitsmessungen zeigen ein minimales Ansprechverhalten von 0,15 m/s.
- Im Vergleich mit in situ Beobachtungen zeigt LSPIV gute Korrelationen $R^2 = 0,82$ für Geschwindigkeits- und $R^2 = 0,83$ für Richtungsmessungen.
- Natürlich vorkommende LSPIV-Tracer (Schaum sowie Oberflächenwellen) sind typischerweise im Offshorebereich vorhanden und durch die Bildanalyse auswertbar.
- Windscherspannungen auf der Meeresoberfläche können durch Richtungsmessungen ermittelt werden.
- Die Visuelle Fernerkundung mittels LSPIV-Verfahren ist für Nadir-ausgerichtete Kamerainstallationen in dieser Studie durch Sonneninterferenzen an der Wasseroberfläche für Zenithwinkel θ_s ($17^\circ \geq \varphi \leq 17^\circ$) begrenzt.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Auf Basis verteilter optischer Sensoren und Fernerkundungsmethoden, gekoppelt mit flexibel einsetzbaren Sensornetzwerken und Datenstromverarbeitungswerkzeugen ermöglichen diese, eine umfassende und integrierte Beobachtung der Umwelt. Hiermit können Informationen für wissenschaftliche und technische Anwendungen aus weitreichenden Gebieten in räumlicher und zeitlicher Dimension gewonnen werden welche mit konventionellen Messtechniken unter anderem schwer zugänglich sind.

Die Entwicklung von Konzepten, Technologien und Anwendungen ist derzeit immer noch teuer, zeitaufwendig und experimentell. Es besteht somit ein Bedarf um diese in realen Umgebungskontext mit fundamentalen Experimenten nachweislich zu erproben und deren Potentiale aufzeigen zu können. Hierfür werden nicht nur reine Messdaten benötigt sondern vielmehr eine Forschungsplattform für Experimente und die Verknüpfung mit Hintergrundinformationen, Metadaten und Semantik.

Diese Arbeit widmet sich in diesem Zusammenhang der Forschungsfrage wie Testfelder für optische Sensoren in realen maritimen Studienumgebungen bereitgestellt und für die Umweltlagebilderstellung sowie optischer Strömungsmessung genutzt werden können. Die aufgezeigte Forschung und die Entwicklungsschritte in dieser Arbeit resultieren dabei in ein flexibel einsetzbares Testfeldsystem für optische Sensoren, mit dem es möglich ist Studienumgebungen als Testfeld zu erschließen um beispielsweise die genannten Anwendungen zu ermöglichen. Der Beitrag dieser Arbeit für die Forschungsgemeinschaft stellt hierbei eine flexibel einsetzbare Forschungsplattform für unterschiedliche Experimente mit Methoden und Werkzeuge für Test- und Simulationsansätze zur Verfügung und geht in unterschiedlichen maritimen Anwendungsszenarien auf weitere Forschungsfragen aus dem Bereich Umwelt und Verkehr ein.

Dieses Kapitel stellt eine Zusammenfassung dieser Arbeit dar und schließt die vorliegende Arbeit ab. Weiterhin zeigt ein Ausblick mögliche Erweiterungen und zukünftige F&E Bereiche mit optischen Sensoren und Testfeldern.

8.1 Zusammenfassung

Um die genannte Forschungsfrage zu bearbeiten gliedert sich diese Arbeit in vier Phasen: Analysephase, Entwurfsphase, Implementierungsphase sowie Test- und Evaluationsphase.

8.1.1 Analysephase

Im Kapitel 2 der Analysephase wurden, ausgehend von den aufgezeigten Problemstellungen, den geplanten Anwendungsstudien der Umweltlagebilderstellung und optischen Strömungsmessung sowie einer Nutzerumfrage, die Anforderungen an das Testfeld identifiziert. Darauf folgend konnte eine systematische Unterteilung und Anforderungszuweisung zu den Testfeldsystemkomponenten Sensoren, Hardware und Software vorgenommen werden. Hierbei wurden auch mögliche technische Lösungsansätze nach Stand der Technik für die Informationsgewinnung mit optischen Sensoren und mögliche Kommunikationstechnologien in maritimen Studenumgebungen anhand bestehender Lösungen anderer Informationstechnologien aufgezeigt. Weiterhin wurden die Arbeitsweisen und Qualitätskriterien von optischen Sensoren aufgezeigt und damit die Grundlage für das Verständnis von Messergebnissen in den Anwendungsstudien gegeben. Im Anschluss wurde ein grobes Architekturkonzept des Testfeldsystems mit verteilten, vernetzten Sensorsystemknoten vorgestellt und die Ebenen von der Sensoranbindung über dem Datenmanagement bis zur Applikation skizziert um die Testfeldfunktionalitäten im Kontrast zu bestehenden Arbeiten reflektieren zu können.

Im Kapitel 3 der Analysephase wurden verwandte Arbeiten im Bezug zu den vorhergehend identifizierten Problemstellungen, Funktionalitäten sowie der Arbeitsweise begutachtet. Hierfür wurden nicht nur unterschiedliche Testfelder, Anwendungen und Informationstechnologien mit optischen Sensoren in maritimen Bereichen aufgezeigt, sondern weiterführend auch im Kontext zur Integration von heterogenen Sensoren sowie vernetzte Testfelder, Arbeiten aus dem Multimedia- und Automobilbereiche betrachtet. Weiterhin wurden unterschiedliche Experimentarchitekturen bestehender Arbeiten mit JDL- oder OODA-Datenfusionsmodell im Hinblick der Anwendbarkeit und Funktionalitäten für das hier behandelte Testfeld mit optischen Sensoren begutachtet und Gemeinsamkeiten für die verteilte Informationsvorverarbeitung und adaptive Konfiguration von Sensoren ausgearbeitet. Im Anschluss wurden unterschiedliche Datenstrommanagementsysteme

und deren Handhabung, zur Integration neuer Schnittstellen und Ressourcen aufgeführt.

Ausgehend von der Betrachtung verwandter Arbeiten wurde der Handlungsbedarf, welcher mit dieser Arbeit aufgegriffen wurde, festgestellt. Es wurde aufgezeigt das keine der bestehenden Systemlösungen optische Sensoren für die gemeinsame Nutzung von verteilten Informationen innerhalb eines maritimen Testfeldes berücksichtigt. Sowie weiterhin eine flexible Forschungsplattform zur optischen Sensordatenverarbeitung mit Schnittstellen für Simulationsumgebungen und einer Wiederholfunktion für Experimente mit gespeicherten Daten erforderlich ist, um Bedürfnisse der Forschungsgemeinschaft entgegenzukommen. Besonders der Aspekt mehrere unterschiedliche optische Sensoren für F&E Studien und Szenarien oder Anwendungen im maritimen Umwelt- und Verkehrsbereich zu kombinieren bleibt überwiegend in den bestehenden Arbeiten unadressiert.

8.1.2 Entwurfsphase

Die Entwurfsphase leitet von dem aufgezeigten Handlungsbedarf im Kontext zu den bestehenden Arbeiten über zu einem detaillierten Design und der Beschreibung eines eigenen Testfeldsystemkonzepts. Hierfür wurde in Kapitel 4 eine physische Testfeldarchitektur entwickelt, welche einen allgemeinen übertragbaren Ansatz auch für andere Studienbereiche und Anwendungen berücksichtigt. Es wurden die unterschiedlichen Ebenen, beginnen von der Informationsgewinnung hin zu den Anwendungen, mit Sensor-, Kommunikations-, sowie Anwendungsebene beschrieben und die Begrifflichkeiten vom lokalen und globalen Weltmodell eingeführt. Die Komponenten der entwickelten Testfeldarchitektur unterstützen hierbei geographisch verteilte Installationen und damit auch verteilte Sensorressourcen und die dezentrale Datenvorverarbeitung. Darüber hinaus wurden an dieser Stelle auch Replay- und Simulations-Sensorsystemknoten vorgestellt.

Weiterhin wurde auf die physische Netzwerkstruktur sowie Netzwerktopologie eingegangen welche die Architekturkomponenten über die Kommunikationsebene verbindet. Zum Schluss der Entwurfsphase wurde noch eine Hardwarearchitektur für optische Sensoren aufgezeigt welche eine grundlegende Operabilität und Mobilität des Testfeldsystems für den Feldeinsatz bereitstellt. Insgesamt wurde in der Entwurfsphase eine Übersicht des gesamten Testfeldsystems, der Arbeitsweise und der Schnittstellen präsentiert.

8.1.3 Implementierungsphase

In der Implementierungsphase im Kapitel 5 wurden die Testfeldkomponenten analog zu der Analysephase in optische Sensoren, Hardware und Software untergliedert und die Integrationsschritte der entwickelten Testfeldarchitektur in explorative Sensorsystemprototypen beschrieben. Die Implementierung begann mit der Auslegung und Qualitätsprüfung der optischen Sensoren. Hierdurch wurde die Eignung der Abbildungsleistung für die vorgesehenen Anwendungen sichergestellt sowie nützliche Informationen zur Kalibrierung der radialsymmetrischen Verzeichnung und thermischen Stabilität für weitere Einsatzmöglichkeiten gewonnen. Darauf folgend wurde die Integration der Hardwarearchitektur sowie der Netzwerkarchitektur beschrieben um einen geographisch verteilten und autarken Testfeldbetrieb mit den Sensorsystemknoten zu ermöglichen.

Im Anschluss daran wurde die Arbeitsweise sowie Architektur des verwendeten DSMS Frameworks Odysseus und die Funktionalität der verteilten Verarbeitung im Netzwerkzusammenschluss aufgezeigt. Um die aufeinander folgenden Informationsverarbeitungsschritte im DSMS aus verteilten Testfeldinformationsquellen hin zu einem umfassenden Umweltlagebild zu veranschaulichen wurde eine JDL-Datenfusionsmodell herangezogen und die Fusionsebenen für optische Sensoren, zeitliche Synchronisation, Merkmal-Ebene und Modell-Ebene eingeführt. Die Fusion auf Modellebene erzielt hierbei ein situatives Umweltlagebild der Umgebung in stationären sowie mobilen Anwendungen. Weiterhin wurden die Entwicklungen für die Kompatibilität von optischen Sensoren, einer adaptiven Konfiguration, Wiederholungsfunktionalitäten von aufgezeichneten Testfeldszenarien sowie Schnittstellen für Simulationsumgebungen präsentiert. Im Bezug zu den ermittelten Funktionalitäten des Testfeldsystems zeigt jedes dieser Kapitel jeweils in einer Zusammenfassung, welche Funktionalitäten implementiert und dadurch abgedeckt wurden.

8.1.4 Test und Evaluationsphase

Basierend auf den in dieser Arbeit entwickelten explorativen Testfeldsystem-Prototypen konnten diese in der Testphase verwendet werden um unterschiedliche maritime Anwendungsstudien unter realen Studienbedingungen durchzuführen. Es wurden umfassende Anwendungsmöglichkeiten für die Entwicklung neuer Anwendungen auf Basis optische Sensordaten und die Bearbeitung von

wissenschaftlichen und technischen Fragestellungen aufgezeigt und damit eine ergänzende alternative Gesamtmessstrategie für die Umweltlagebilderstellung sowie optische Strömungsmessung geschaffen.

Hierfür wurde in Kapitel 6 die Anwendung und Evaluation zur Umweltlagebilderstellung mit stationär betriebenen Testfeldern und darüber hinaus mit mobilen schiffsgestützten Testfeldern präsentiert. Die Anwendungen richteten sich insgesamt auf relevante Situationen und an unterschiedliche Forschungsfragen aus dem Verkehrs- und Umweltbereich in der maritimen Umgebung. Es wurde gezeigt dass der Ansatz mehrere vernetzte, geographisch verteilte Sensorsysteme zu einem gesamten Testfeld zusammenzuschließen, geeignet ist für die Abdeckung von großen geographischen Studiengebieten. Mit dem Testfeld wurden hierbei einzelne Datenströme von mehreren verteilten optischen Sensoren zu einem situativen Umweltlagebild fusioniert und für Nutzer unmittelbar zur Verfügung gestellt. Es konnte auch gezeigt werden dass die in räumlicher und zeitlicher Dimension gewonnenen Informationen gleichzeitig für die Diskriminierung von Umweltzuständen und des maritimen Verkehrs genutzt werden können. Darüber hinaus wurden umfassende Testfeldszenen als Datensätze für weitere F&E aufgezeichnet. Diese Datensätze können durch die erprobte und nachgewiesene Funktionalität des Testfeldsystems für Wiederholungen und die Simulationen von Testfeldszenarien, beispielsweise für Demonstrationsvorhaben, weitere Applikationen oder Trainingszwecke verwendet werden.

In Kapitel 7 einer Anwendungsstudie wurde ein Testfeld vorgestellt und evaluiert, welches Offshore für die weitere Entwicklung eines LSPIV-Fernerkundungsmessverfahrens erfolgreich genutzt wurde um damit kontinuierlich Meeresoberflächenströmungen in einer hohen zeitlichen Auflösung zu messen, welche ansonsten für die Forschung nicht zugänglich wären.

Die Zielsetzung der technischen Entwicklung eines Testfeldsystems, welches flexible Testfelder für optische Sensoren mit Werkzeugen und Methoden für die maritime Forschung und Entwicklung bereitstellt, sowie die Erprobung von Testfeldern in realen Studienumgebungen für Anwendungsentwicklungen zur Erzeugung von Umweltlagebildern und optischer Strömungsmessung wurde durch diese Arbeit erfolgreich aufgezeigt und in den Anwendungsstudien evaluiert. Die Bewertung der Studien bestätigt dass die entwickelte Forschungsplattform in Form eines Testfeldes für optische Sensoren die Ziele dieser Arbeit abdecken.

8.2 Ausblick

Im Hinblick auf die Zielsetzung, ein Testfeld für optische Sensoren bereitzustellen und dieses für die Umweltlagebilderstellung und optische Strömungsmessung in maritimen Studiengieten zu verwenden, konnte mit dieser Arbeit erfolgreich abgeschlossen werden. Das Testfeld ist jedoch durch dessen universelle Architektur und Funktionen nicht nur allein in dem maritimen Studienbereich dienlich. Obwohl die Forschung und Entwicklung in dem maritimen Bereich derzeit und wohl auch zukünftig immer noch einige Neuerungen und Erkenntnisse hervorbringen wird. Nachfolgend wird in diesem Zusammenhang ein Ausblick für technische und wissenschaftliche Weiterentwicklungen gegeben.

Optische Sensoren: Sensoren bilden die Grundlage für die Informationsgewinnung in diesem Testfeldsystem, daher sind weitere passive als auch aktive Multi- und Hyperspektralsensoren förderlich um neue Erkenntnisse für viele Anwendungsbereiche, beispielsweise aus dem Umwelt- und Verkehrsbereich, zu erhalten und damit bekannte Bildfusionsansätze aus der Fernerkundung zu nutzen (van der Meer und de Jong 2011). Weiterhin zeigen aktuelle Entwicklungen das Potential von adaptiven aktiven Polarisationsfiltern in Kombination mit visuellen Kameras auf, um Umgebungslichtinterferenzen wie Reflexionen an Oberflächen zu minimieren und kontrastreiche Bildinformationen zu erhalten (Calisti et al. 2017). Eine interessante Erweiterung wären auch abbildende Fourier Transform Infrarot (FTIR) Spektrometer zur Fernerkundung von brandgefährlichen Gasen (Sabbah 2012) oder LIDAR-Scanner auf LIF Basis. Neue Entwicklungen im Bereich der IR-Kameras bieten in Zukunft für die Umweltbeobachtung eine erweiterte Bild- und Temperaturauflösung, welche für Testfeldapplikationen in großen Studiengieten sowie unter Umwelteinflüssen Vorteile erwarten lassen.

Kommunikation: Um weitreichende verteilte Gebiete und Teilnehmer mit Informationen zu versorgen könnten weitere Kommunikationstechnologien zusätzlich zu WLAN und LTE integriert werden. Die Schnittstellen im Testfeldsystem bieten hierfür unterschiedliche Erweiterungen. Auf eine Live-Datenübertragung eines umfassenden Umweltlagebildes auf Basis verteilter Videodatenströme müsste dann jedoch aufgrund der limitierten Datenübertragungsrate bei den meisten bestehenden Technologien verzichtet werden. Dafür könnten andere, als räumliche Lagebildinformation dienliche, semantische Informationen aus den verteilten optischen Sensordaten herausgearbeitet werden, die dann mit geringerer Bandbreite

übertragbar wären. Denkbar sind hierfür unterschiedliche Layer auf Basis von Vektor oder Rasterdaten der Umgebung in Anlehnung an die Datenbasis von GIS-Informationssystemen bereitzustellen. Die Grundlagen in Form einer Belegungskarte wurden in dieser Arbeit dafür bereits aufgezeigt.

Anwendungen: Die gewonnenen raum- und zeitaufgelösten Informationen können im Allgemeinen für unterschiedliche wissenschaftliche Zwecke verwendet werden und das Testfeld für fundamentale in situ Experimente für verschiedene Anwendungen eingesetzt werden. Das entwickelte Testfeldsystem bietet hierfür eine Plattform mit flexiblen Schnittstellen und Sensorfusionstechnologie um Feldstudien in verteilten geographischen Gebieten sowie Szenen -Wiederholungen und -Simulationen durchzuführen und integriert hierdurch einige Aspekte für zukünftige Multiplattform-Beobachtungen. Als weitere Anwendung wären beispielsweise Dienstleistungen im Bereich von e-Navigation, die Überwachung von wechselnden Umweltbedingungen (Winter 2017) oder Umweltverschmutzungen sowie strukturelles Monitoring denkbar (Feng und Feng 2016). Weiterhin auch Anwendungen im Kontext der sozio-technologischen Forschung, wie die Erzeugung von verteilten Umwelt- Situationsbewusstsein und damit einhergehende erforderliche Kommunikationsstrategien für Kooperationen zwischen Mensch-Mensch und Mensch-Maschine zu verbessern. Wie in dieser Arbeit gezeigt wurde können Schiffe als mobiles Testfeld oder fahrender Sensorsystemknoten ausgestattet werden. Gleichmaßen ist es denkbar auch weitere mobile Anwendungen mit einem Testfeld im automobilen Verkehrsbereich ergänzend zu Fahrzeug-Ad-hoc-Netzwerken (Vehicular Ad Hoc Network, VANETs) zu realisieren (Ghafoor 2016). Weiterhin besteht ein Interesse um Informationen aus der Fläche in Relation mit Punktmessungen zu bringen und diese damit ergänzend im Kontext zu der Umweltsituation zu vergleichen und bewerten zu können. Beispielsweise können dadurch Messdaten von Langzeitbeobachtungsplattformen, wie der beschriebenen offshore Zeitserienstation Spiekeroog, im Zusammenhang zu den geographischen Gegebenheiten der dynamischen maritimen Umwelt gebracht werden. Im Bezug dazu konnten schon erste weitere Entwicklungen für die luftgestützte Fernerkundung mit den aufgezeigten optischen Sensoren durchgeführt und erprobt werden (Wellhausen et al. 2017). Die gegenwärtigen Ergebnisse zeigen weitere, vormals schwer zugängliche, räumlich zeitliche Zusammenhänge in unterschiedlichen Studiengebieten der Umweltbeobachtung auf.

Anhang A: Implementierung von e-Navigation Services

Für die Entwicklung und das Design zukünftiger e-Navigation Services zeigt die International Maritime Organisation (IMO) potentielle Schritte auf, worin neue Entwicklungen oder Verbesserungen die beabsichtigten Nutzervorteile eindeutig voranstellen. Abbildung A.1 zeigt die Prozessschritte zur Entwicklung: Identifizierte Bedürfnisse und entsprechende Lösungen berücksichtigen technische-, betriebliche Prozesse, Ausbildung und regulatorische Aspekte.

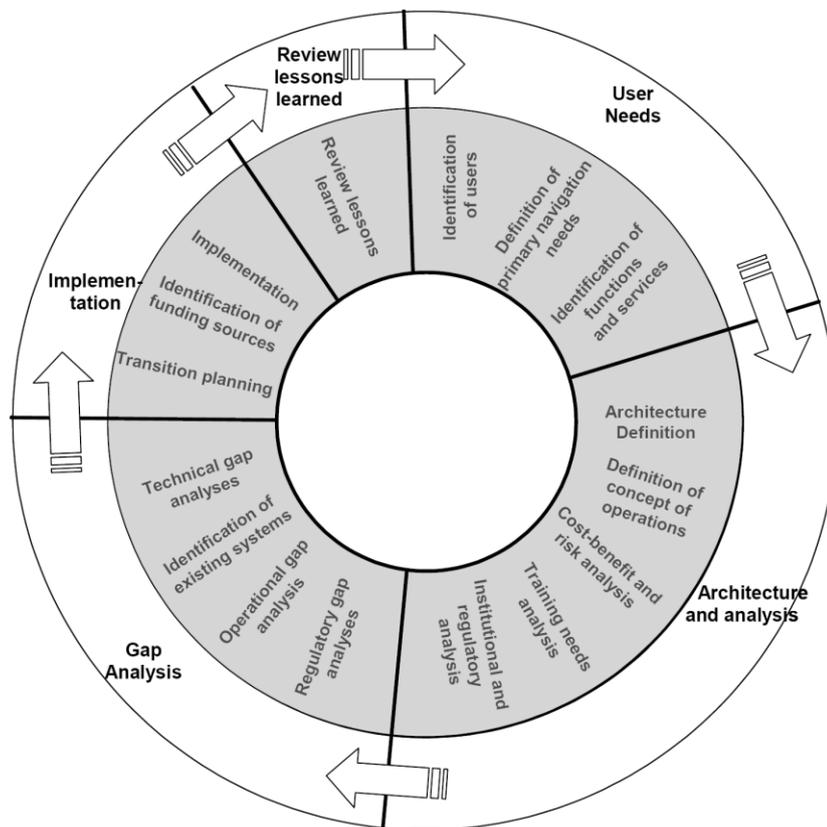


Abbildung A.1: Potentielle Schritte zur Implementierung von e-Navigation Services
Quelle: (IMO 2008)

Anhang B: Detaillierte Anforderungsermittlung

Um Formal die Anforderungen aus den Problemstellungen a) - d) sowie den Zielsetzungen I und II zu identifizieren, können diese den einzelnen Systemkomponenten und Funktionalitäten (HW, SW, Sen, Fkt., n. Fkt.) zugeordnet werden. Dabei besteht die Möglichkeit das einzelne Anforderungen auch durch unterschiedliche Testfeldkomponenten abgedeckt werden.

Anforderungen aus Problemstellung a) Technischen Lösung für eine Testfeldausstattung zur Verarbeitung und Kommunikation von hochvolumigen Livedaten von optischen Sensoren.:

- 1) Einsetzbar für e-Navigation, zivilen maritimen Bereich, *HW, SF, n. Fkt.*
- 2) Live-Videodarstellungen der Umgebung, *SF, Sen, Fkt.*
- 3) Eingeschränkte Datenübertragung / Standards ergänzen, *HW, SF*
- 4) Testfeld muss flexibel einsetzbar sein, *n. Fkt.*
- 5) Kommunikation und Energieversorgung bereitstellen, *HW*
- 6) Autarke Arbeitsweisen ermöglichen, *HW, SW*
- 7) Zentrale Verwaltung geographisch verteilter Systemknoten, *HW, SF*
- 8) Ohne Eingriff oder Störung der Umwelt / techn. Infrastruktur, *HW, SW, n. Fkt.*
- 9) Verarbeitung und Kommunikation von hochvolumigen Livedaten, *SF*

Anforderungen aus Problemstellung b) Sensorverarbeitungsplattform für optische Sensoren.:

- 10) Merkmalen die für den reproduzierbaren Einsatz, *Sen, SF*
- 11) Flexiblen Sensorkonfiguration während der Laufzeit, *SF*
- 12) Informationsqualitätsverarbeitung, *SF*
- 13) Validierung von Sensorverarbeitungsabfragen, *SF*
- 14) Darstellung (HMI), *SF*
- 15) Simulation, Ausführung und Auswertung, *SF*

Anforderungen aus Problemstellung c) Flexibles Testfeld zur Erforschung und Erprobung von optischen Sensoren und maritimen Anwendungen.:

- 16) Auf Wasserwegen und in Häfen einsetzbar, *HW, SF, n. Fkt.*
- 17) Informationen für mehrere Nutzer bereitstellen, *SF, Fkt.*
- 18) Anwendungen und optischen Sensoren ermöglichen, *HW, SF, Sen, n. Fkt.*
- 19) Ein umfassendes Bild der näheren Umgebung zur Verfügung stellen

Anforderungen aus Problemstellung d) Messverfahren um offshore horizontale Strömungsdynamiken zeitlich hochaufgelöst zu erfassen.:

- 20) Information über Oberflächenströmungsbedingungen ableiten, *Sen, SW*
- 21) Offshore einsetzbar, *HW, SF, n. Fkt.*
- 22) Zeitlich hochaufgelöste Daten bereitstellen, *HW, SF, Fkt.*

Anforderungen aus Zielsetzung 1) Die technische Entwicklung eines Frameworks welches flexible Testfelder für optische Sensoren mit Werkzeugen und Methoden für die maritime Forschung und Entwicklung bereitstellt.:

- 23) Kommunikationskanäle bereitstellen, *HW, SW*
- 24) Schnittstellen für Simulationen, *SW*
- 25) Qualitätsorientierte Bearbeitung ermöglichen, *SW*
- 26) Hochvolumige Datenstromverarbeitung, *SW*
- 27) Individuelle Datenstromabfragen, *SW*
- 28) Datenstrommanagementsystem, *SW*
- 29) Autarke Arbeitsweise, *HW, Fkt.*
- 30) Fernzugriff / Wartung ermöglichen, *HW, SW, Fkt.*
- 31) Weiträumig einsetzbar, *HW, n. Fkt.*
- 32) Feldtauglich, *HW, n. Fkt.*
- 33) Stationär als auch mobiler Betrieb, *HW, n. Fkt.*
- 34) Übertragbar auf andere Trägerplattformen, *n. Fkt.*
- 35) Zeitlich uneingeschränkt verfügbar, *HW, SW, Fkt.*
- 36) Erweiterungsfähigkeit, *HW, SW, Fkt.*
- 37) Onlineerkennung relevanter Situationen ermöglichen, *Sen, SW, Fkt.*
- 38) Aufnahme von Daten und Metainformationen, *SW, Fkt.*
- 39) Wiederverwendung von Daten ermöglichen, *SW, Fkt.*

Anforderungen aus Zielsetzung 2) Die Erprobung von Testfeldern in realen Studienumgebungen für Anwendungsentwicklungen zur Erzeugung von Umweltlagebildern und optischer Strömungsmessung.:

- 40) Verteilte optische Informationen fusionieren, *SW*
- 41) Information an mehrere Nutzer bereitstellen, *SW, HW, Fkt.*
- 42) Unmittelbare Informationsbereitstellung, *HW, SW, n. Fkt.*
- 43) „Services“ erproben und validieren, *SW, n. Fkt.*
- 44) Optische Technologien erproben und validieren, *Sen, n. Fkt.*
- 45) Anwendung für Forschung und Entwicklung (Umwelt / Verkehr), *n. Fkt.*
- 46) An- und Ablegeassistenz in Häfen und Schleusen
- 47) Umgebungsbild eines Schiffes bereitstellen, *Fkt.*
- 48) Erkennung von Personen im Wasser mittels optischer Sensoren, *Sen, Fkt.*
- 49) Fernerkundung der Meeresoberflächentemperatur, *Sen, Fkt.*
- 50) Offshore Einsetzbar, *HW, SF, n. Fkt.*
- 51) Langzeitbeobachtungen ermöglichen, *HW, SF, Fkt.*

Anhang C: Radialsymmetrische Verzeichnung und intrinsische Parameter

Die charakteristische radialsymmetrische Verzeichnung für ein Objektiv lässt sich im Allgemeinen mit genügender Genauigkeit durch ein Polynom ungerader Potenzen des Bildradius wie folgt darstellen (Godding 2002):

$$dr_{sym} = A_1(r^3 - r_0^2 r) + A_2(r^5 - r_0^4 r) + A_3(r^7 - r_0^6 r) \quad (\text{A.1})$$

mit

dr_{sym} : Radialsymmetrische Verzeichnungskorrektur

r : Bildradius aus $r^2 = x^2 + y^2$

A_1, A_2, A_3 : Polynomkoeffizienten

r_0 : Zweiter Nulldurchgang der Verzeichnungskurve

wobei

$$dx_{sym} = \frac{dr_{sym}}{r} x \quad , \quad dy_{sym} = \frac{dr_{sym}}{r} y \quad (\text{A.2})$$

C.1 Verzeichnung visuelles Objektiv, Typ LM6HC

Die intrinsischen Parameter Typ LM6HC in Kombination mit Basler acA2040-gc im Einzelnen:

Ck	:	-5.8947	0.000171593
Xh	:	-0.120447	0.000140256
Yh	:	-0.0819463	0.000163974
A1	:	-0.00453161	2.76979e-006
A2	:	7.38236e-005	1.29479e-007
A3	:	-4.07278e-007	1.89151e-009
B1	:	0.000127169	1.01592e-006
B2	:	-2.14855e-005	1.1704e-006
C1	:	5.99713e-005	5.59514e-006
C2	:	-8.22154e-006	5.68965e-006

Detailzuordnung: rechte Spalten = Standardabweichungen; Ck = Brennweite; Xh und Yh = Bildhauptpunkt; A1, A2, A3 = radial-symmetrische Verzeichnung, als Polynomserie; B1, B2 = radial-asymmetrische (tangente) Verzeichnung; C1, C2 = Affinität und Scherung; Einheiten jeweils mm.

C.2 Verzeichnung IR Objektiv

Die intrinsischen Parameter von IR-Kameraobjektiven in Kombination mit Optris PI450 IR Mikrobolometer im Einzelnen:

- 13 Grad Öffnungswinkel

Ck	:	-41.2252	0.0360333
Xh	:	-0.921308	0.111582
Yh	:	-0.0711417	0.0948401
A1	:	-0.00010323	2.47689e-005
A2	:	9.75323e-007	1.62397e-006
A3	:	-3.22543e-008	3.11228e-008
B1	:	-0.000127833	1.38761e-005
B2	:	5.14712e-005	1.14956e-005
C1	:	0.00157963	0.000278483
C2	:	-0.00239882	0.00029212

- 38 Grad Öffnungswinkel

Ck	:	-14.4391	0.0140885
Xh	:	-0.150558	0.0132445
Yh	:	-0.0407696	0.0189636
A1	:	-0.000702982	5.41151e-005
A2	:	-1.48088e-005	4.29162e-006
A3	:	4.79218e-007	1.02384e-007
B1	:	-0.000341675	1.34932e-005
B2	:	-4.77949e-005	1.85321e-005
C1	:	-0.0241372	0.00015077
C2	:	0.000806087	0.000134661

- 62 Grad Öffnungswinkel

Ck	:	-8.76062	0.00639374
Xh	:	-0.0592621	0.00571854
Yh	:	0.0741127	0.00723528
A1	:	-0.00131291	6.37877e-005
A2	:	9.5802e-006	5.2457e-006
A3	:	6.34412e-007	1.28859e-007
B1	:	-0.000354787	2.33466e-005
B2	:	0.000337163	2.74034e-005
C1	:	-0.0461395	0.000135586
C2	:	-7.82967e-005	0.00014068

Detailzuordnung: rechte Spalten = Standardabweichungen; Ck = Brennweite; Xh und Yh = Bildhauptpunkt; A1, A2, A3 = radial-symmetrische Verzeichnung, als Polynomserie; B1, B2 = radial-asyymetrische (tangentele) Verzeichnung; C1, C2 = Affinität und Scherung; Einheiten jeweils mm.

Anhang D: Visuelle Kamera-Objektbetrachtung

Abbildung D.1 zeigt Graphen zur visuellen Kamera / Objektiv-Kombination (acA2040-gc und LM6HC) Grundlegend ist die Betrachtung darauf ausgelegt eine Übersicht zu geben wie viele Kamerapixel (IFOV) von einem Objekt der Dimension $G_{x,y}$ von 1 m, in Abhängigkeit der Distanz d zum Objekt belegt werden (schwarzer Graph). Weiterhin zeigt der Graph welche Dimension $G_{x,y}$ einnehmen muss (wie groß ein Objekt vorliegen sollte) in Abhängigkeit zu der Entfernung d zur Kamera um die Bedingung der Belegung von 3×3 Pixel IFOV einzuhalten (roter Graph) nach Formel: $d = \frac{f G_{x,y}}{3 IFOV_{dx,dy}}$. Nachvollziehbar können die exemplarisch vorgestellten Ergebnisse aus Kapitel 5.1.1 entnommen werden.

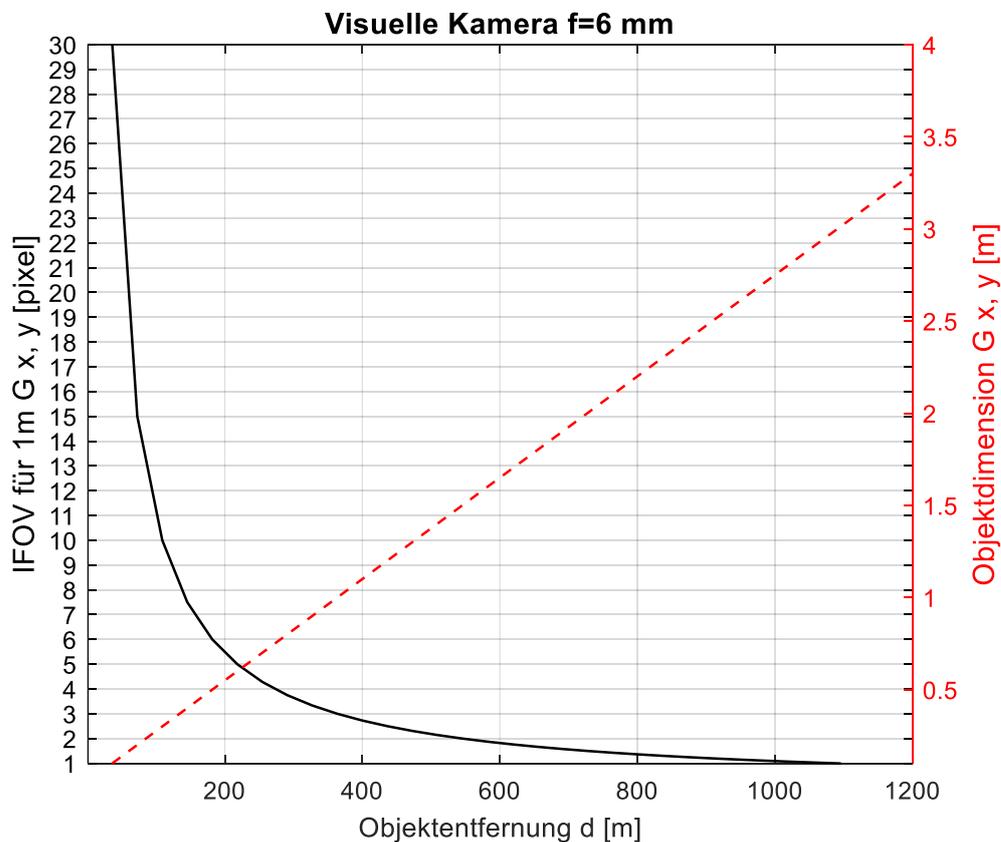


Abbildung D.1: Schwarzer Graph mit IFOV (Pixel auf Kameramatrix mit $5,5 \mu\text{m}$ Pixelgröße) für eine Objektdimension $G_{x,y}$ von 1 m, aufgetragen gegen die Objektentfernung auf der linken Achse. Rechte Achse (roter schraffierter Graph) mögliche Objektdimension im Bezug zur Objektentfernung unter der Voraussetzung der Belegung von 3×3 IFOV (Pixel auf der Kamera CCD)

Anhang E: Auflösung, Stabilität, NUC, IR-Kamera

Die Temporauflösung, Stabilität sowie NUC (non uniformity-correction) der IR-Kamera sollte vor einer Integration in dem Testfeld untersucht werden. Die Informationen dazu sind nützlich um radiometrische Messaufgaben im Testfeld und deren Ergebnisse qualitativ bewerten zu können. Als homogenes Messobjekt (grauer Strahler) diente die Oberfläche eines Wasserbades (19,35 °C) unter Laborbedingungen, wie auch in anderen Studien (Tempelhahn et al. 2016) publiziert. Temperaturreferenzmessungen der Umgebung sowie des Wasserkörpers wurden mit hochauflösenden kalibrierten Temperaturloggern (DEFI-T Miniature Temperature Recorder, JFE Advantech, Japan) durchgeführt. Die Temperaturmessdaten der IR-Kamera ($\varepsilon = 0,96$) wurden für die interne Gerätetemperatur (Intern), die FPA-Sensormatrix (Chip) sowie einem Messpunkt (5×5 Pixel) am äußeren Rand und einem Messpunkt in der Mitte des FPA im Intervall von 1 s erhoben. Während des gesamten Einsatzzeitraums wurde eine automatische online - Kalibrierung der Kamera mit 12 s Flagintervall durchgeführt.

Die Ergebnisse in Abbildung E.1, oben zeigen eine Einschwingphase für die Messpunkte (Mitte / Seite) von ca. 40 Minuten während der Aufwärmphase der Kamera. Ähnliche Aufwärmzeiten wurden auch in anderen Studien beobachtet (Kusnierek und Korsæth 2014). Messaufgaben sollten daher erst nach einer angemessenen Stabilisierungszeit beim Einsatz oder Wechsel der Umgebungen beginnen. Für die Messpunkte kann eine langfristig betrachtete Temporauflösung von $\pm 0,25$ K erzielt werden und ist hauptsächlich limitiert durch Drift des Mikrobolometersensors (Nugent und Shaw 2014). Höhere Stabilitäten und damit Temporaufösungen sind daher nur durch kurze online-Kalibrierungszeiten realisierbar. Die absolut gemessene Temperatur in der Mitte der FPA-Sensormatrix von 19,3 °C weicht um 0,05 K von der Referenztemperatur des externen Temperaturloggers ab und ist damit für die angedachten maritimen Umweltbeobachtungsaufgaben gerade noch ausreichend. Höhere Abweichungen gegenüber der absoluten Referenztemperatur zeigen sich an dem Bildrand (20,05 °C, $d_T = 0,7$ K), wie in Abbildung E.1, unten dargestellt. Die Abweichungen am Bildrand sind auf unzureichende radiometrische Korrekturfaktoren (z. B. projektionsabhängig durch Optik) des Kameramodells zurückzuführen. Unter idealen Umständen sollten interne NUC-Kameraparameter (non uniformity-correction) gleiche Temperaturwerte über die gesamte Mikrobolometermatrix gewährleisten (Hoelter und Meyer 1998).

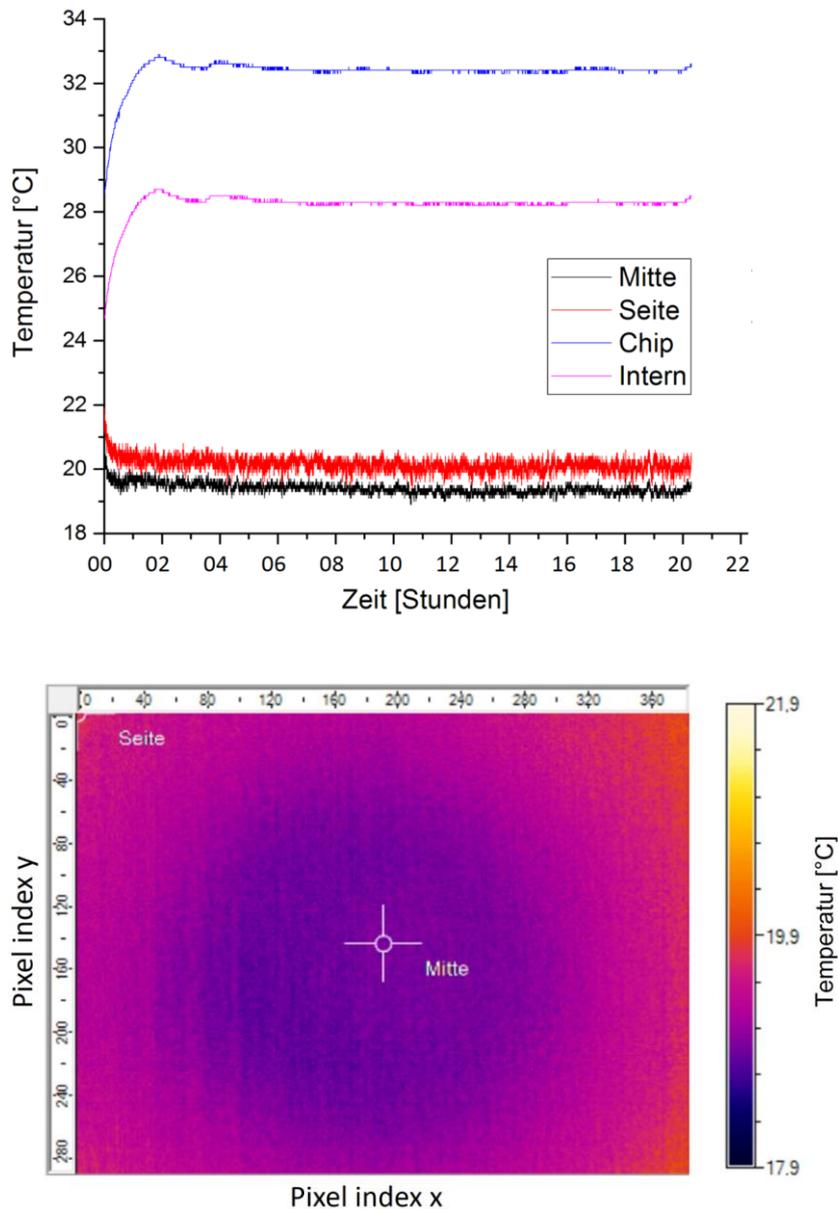


Abbildung E.1: Temperaturverlauf während des Temperatur-Stabilitätstests der IR-Kamera (oben), für die interne Gerätetemperatur (pink), die FPA-Sensormatrix (blau), einem 5×5 Pixel Messpunkt am äußeren Rand der FPA-Sensormatrix (rot) und einem 5×5 Pixel Messpunkt in der Mitte der FPA-Sensormatrix (schwarz), zeigt ein Einschwingverhalten während der Aufwärmphase. Unten: NCU (non uniformity-correction) Temperatur-Koeffizientenmatrix des IR-Kamerabildes zeigt projektionsabhängige radiometrische Verzeichnungen

Anhang F: IR Kamera-Objektbetrachtung

Abbildung F.1 zeigt Graphen zur den IR-Kamera / Objektiv-Kombinationen (PI450 und Wechselobjektive) der verfügbaren Objektivbrennweiten. Grundlegend ist die Betrachtung darauf ausgelegt eine Übersicht zu geben wie viele Bolometer-FPA-Pixel (IFOV) von einem Objekt von der Dimension $G_{x,y}$ von 1 m, in Abhängigkeit der Distanz zum Objekt d , belegt werden (durchgehende Graphen). Weiterhin zeigt der Graph welche Dimension $G_{x,y}$ einnehmen muss (wie groß ein Objekt vorliegen sollte) in Abhängigkeit der Entfernung d zur Kamera um die Bedingung der Belegung von 3×3 Pixel IFOV einzuhalten (schraffierte Graphen) nach Formel: $d = \frac{f G_{x,y}}{3 IFOV_{dx,dy}}$. Nachvollziehbar können die exemplarisch vorgestellten Ergebnisse aus Kapitel 5.1.2 entnommen werden.

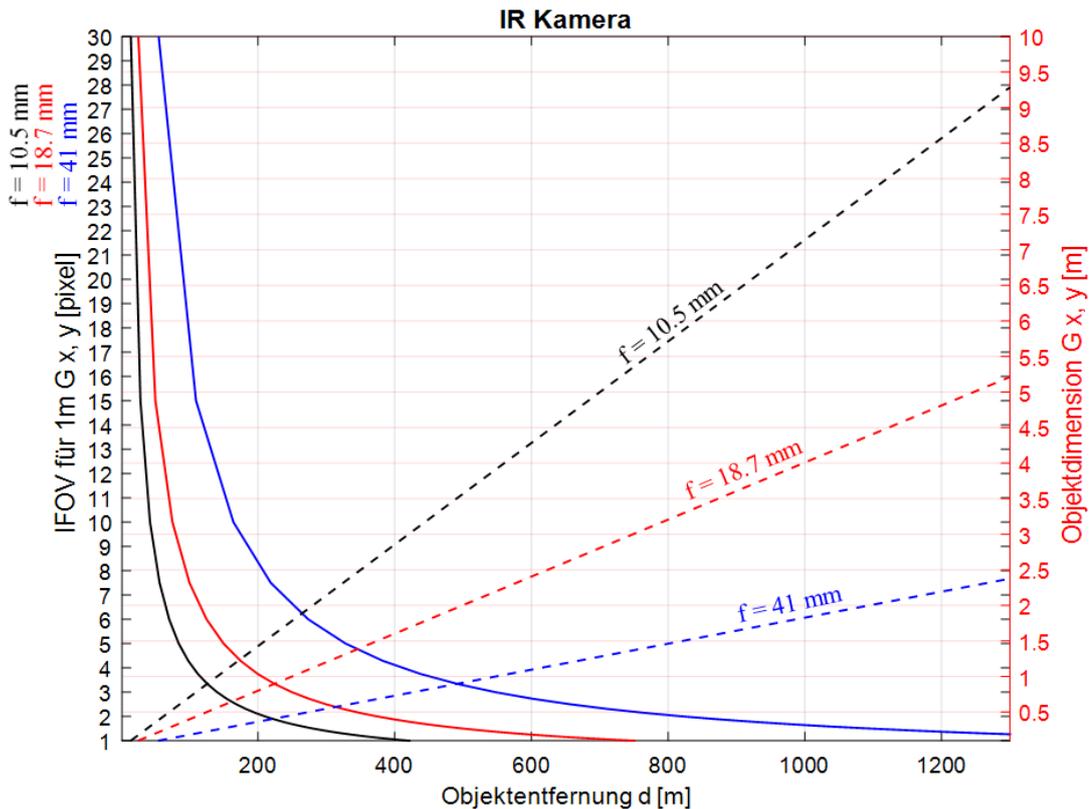


Abbildung F.1: Graph mit IFOV (Pixel auf IR-Kameramatrix mit $25 \mu\text{m}$ Mikrobolometer FPA) für eine Objektdimension $G_{x,y}$ von 1 m, aufgetragen gegen die Objektentfernung auf der linken Achse (durchgehende Graphen). Rechte Achse (schraffierte Graphen) mögliche Objektdimension im Bezug zur Objektentfernung unter der Voraussetzung der Belegung von 3×3 IFOV (Pixel des Bolometer-FPA)

Anhang G: Unsicherheiten LSPIV Verfahren

Tabelle G.1: Unsicherheiten LSPIV Verfahren. Nach einer Studie von Kim 2006

Unsicherheit LSPIV Verfahren	
Kurzzeichen	Veranschlagte Fehler (Bestandteile*)
Illumination	
u_{i11}	Globale Illumination (B, P, G)
u_{i12}	Lokale Illumination ungleichmäßig (P, L)
Tracer	
u_{s1}	Clusterbildung, Gruppierung (B,L)
u_{s2}	Verfolgung (z. B. Wind) (B, P, L)
Datenaufzeichnung	
u_{r1}	Bildauflösung (B, G)
u_{r2}	Zeitintervall zwischen Bildern (B, P, G)
u_{r3}	Abtastzeit (B, P, G)
u_{r4}	Kamerabewegung (B, P, G, n. z.)
Transformation / Orthorektifizierung	
u_{t1}	Distanz (B, P, G)
u_{t2}	Marker punkt Identifikation (P, G)
u_{t3}	Helligkeitsverteilung (B, P, L)
u_{t4}	Kamera Positionierung und Orientierung (B, n. z.)
u_{t5}	Abbildungsmaßstab (B, n. z.)
Verarbeitung	
u_{p1}	Peak auffinden (B, P, G)
u_{p2}	Hintergrundrauschen (P,G)
u_{p3}	Geschwindigkeitsgradient Abweichung (P, L)
u_{p4}	Abfragebereich (P, G)
u_{p5}	Suchbereich (P, n. z.)
u_{p6}	Fensteroffset (P, n. z.)
u_{p7}	Bewegung aus der Ebene (P)
u_{p8}	Bildverzeichnung (P, G)
u_{p9}	Bild Quantisierung (P, G)
u_{p10}	Tracerdichte (B, P, G)
u_{p11}	Tracergröße (B, P, G)
u_{p12}	Tracer Helligkeit und Kontrast (B, P, G)
Nachbearbeitung	
u_{pp1}	Filterung Geschwindigkeitsverteilung (P)
u_{pp1}	Minimaler Korrelationskoeffizient (P)

*B = Bias (systematischer Fehler), P = Präzision (zufälliger Fehler)

G = Globaler Fehler (konstant über das Bild)

L = Lokaler Fehler (Variation im Gitterpunkt zum nächsten über das Bild)

n. z. = Nicht zutreffend für die vorliegende Konfiguration

Literaturverzeichnis

- Abadi, D. J.; Ahmad, Y.; Balazinska, M.; Cetintemel, U.; Cherniack, M.; Hwang, J.-H. et al. (2005): *The Design of the Borealis Stream Processing Engine*. In: Cidr, Bd. 5, S. 277–289.
- Abidi, B. R.; Abidi, M. A.; Aragam, N. R.; Yao, Y. (2008): *Survey and analysis of multimodal sensor planning and integration for wide area surveillance*. In: *ACM Comput. Surv.* 41 (1), S. 1–36. DOI: 10.1145/1456650.1456657.
- AIA (2013): *GigE Vision Standard Specification ver. 2.0.03*. Hg. v. Automated Imaging Association. Online verfügbar unter www.visiononline.org/gigevision, zuletzt geprüft am 25.06.2017.
- Akyildiz, I. F.; Melodia, T.; Chowdhury, K. R. (2008): *Wireless Multimedia Sensor Networks. Applications and Testbeds*. In: *Proc. IEEE* 96 (10), S. 1588–1605. DOI: 10.1109/JPROC.2008.928756.
- Appelrath, H.-J.; Geesen, D.; Grawunder, M.; Michelsen, T.; Nicklas, D. (2012): *Odysseus: A Highly Customizable Framework for Creating Efficient Event Stream Management Systems*. In: Andreas Behrend, Adrian Paschke, Francois Bry, Patrick Eugster und Christof Fetzer (Hg.): the 6th ACM International Conference. DEBS. Berlin, Germany, S. 367–368. DOI: 10.1145/2335484.2335525.
- Arasu, A.; Babcock, B.; Babu, S.; Datar, M.; Ito, K.; Nishizawa, I. et al. (2003): *STREAM: the stanford stream data manager (demonstration description)*. In: Proceedings of the 2003 ACM SIGMOD international conference on Management of data. ACM, S. 665.
- Attia, T. M. (2016): *Importance of communication and information technology and its applications in the development and integration of performance in seaports*. In: *Renewable Energy and Sustainable Development* 2 (2), S. 137–146.
- Babcock, B.; Babu, S.; Datar, M.; Motwani, R.; Widom, J. (2002): *Models and issues in data stream systems*. In: Serge Abiteboul, Phokion G. Kolaitis und Lucian Popa (Hg.): Proceedings of the twenty-first ACM SIGMOD-SIGACT-SIGART symposium. Madison, Wisconsin, S. 1–16. DOI: 10.1145/543613.543615.

- Babichenko, S. (2008): *Laser Remote Sensing of the European Marine Environment: LIF Technology and Applications*. In: Vittorio Barale und Martin Gade (Hg.): *Remote Sensing of the European Seas*. Dordrecht: Springer Science+Business Media B.V., S. 189–204. DOI: 10.1007/978-1-4020-6772-3_15, ISBN: 978-1-4020-6771-6.
- Basler AG (Hg.) (2008): *Controlling Packet Transmission Timing with the Interpacket and Frame Transmission Delays on Basler GigE Vision Cameras* (Application Notes, AW000649 V02). Online verfügbar unter https://www.baslerweb.com/fp-1481127658/media/downloads/documents/application_notes/AW0006490200_0_Controlling_Packet_Timing_With_Delays.pdf, zuletzt geprüft am 25.06.2017.
- Basler AG (Hg.) (2012): *Ace GigE UM.book* (AW000893). Online verfügbar unter <https://www.baslerweb.com/de/support/downloads/downloads-dokumente/basler-ace-gige-users-manual/>, zuletzt geprüft am 25.06.2017.
- Basler AG (Hg.) (2013): *Optimales Sehvermögen durch Kameras in intelligenten Verkehrssystemen*. Unter Mitarbeit von Enzio Schneider. Online verfügbar unter www.i2s-vision.fr/upload/BAS1302_Whitepaper_ITS_e.pdf, zuletzt geprüft am 25.06.2017.
- Baykal, C.; Sumer, B. M.; Fuhrman, D. R.; Jacobsen, N. G.; Fredsoe, J. (2015): *Numerical investigation of flow and scour around a vertical circular cylinder*. In: *Philosophical transactions. Series A, Mathematical, physical, and engineering sciences* 373 (2033). DOI: 10.1098/rsta.2014.0104.
- Bechle, A. J.; Wu, C. H. (2014): *An entropy-based surface velocity method for estuarine discharge measurement*. In: *Water Resour. Res.* 50 (7), S. 6106–6128. DOI: 10.1002/2014WR015353.
- Bechle, A. J.; Wu, C. H.; Liu, W.-C.; Kimura, N. (2012): *Development and Application of an Automated River-Estuary Discharge Imaging System*. In: *J. Hydraul. Eng.* 138 (4), S. 327–339. DOI: 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000521.
- Biem, A.; Bouillet, E.; Feng, H.; Ranganathan, A.; Riabov, A.; Verscheure, O. et al. (2010): *IBM infosphere streams for scalable, real-time, intelligent*

- transportation services*. In: Proceedings of the 2010 ACM SIGMOD International Conference on Management of data. ACM, S. 1093–1104.
- Bloisi, D.; Iocchi, L. (2009): *Argos—A video surveillance system for boat traffic monitoring in Venice*. In: *International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence* 23 (07), S. 1477–1502.
- Bloisi, D. D.; Previtali, F.; Pennisi, A.; Nardi, D.; Fiorini, M. (2017): *Enhancing Automatic Maritime Surveillance Systems With Visual Information*. In: *IEEE Trans. Intell. Transport. Syst.* 18 (4), S. 824–833. DOI: 10.1109/TITS.2016.2591321.
- BMWi (2017a): *Maritime Agenda 2025*. Für die Zukunft des maritimen Wirtschaftsstandortes Deutschland. Unter Mitarbeit von Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. Berlin. Online verfügbar unter https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Wirtschaft/maritime-agenda-2025.pdf?__blob=publicationFile&v=16, zuletzt geprüft am 25.06.2017.
- BMWi (2017b): *Gemeinsame Erklärung zur Digitalisierung in der maritimen Wirtschaft*. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur. Hamburg. Online verfügbar unter https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/M-O/positionspapier-digitalisierung-maritimer-wirtschaft-a.pdf?__blob=publicationFile&v=22, zuletzt geprüft am 25.06.2017.
- Bolles, A.; Geesen, D.; Grawunder, M.; Jacobi, J.; Nicklas, D.; Appelrath, H.-J. (2010): *Sensordatenverarbeitung mit dem Open Source Datenstrommanagementframework Odysseus*. In: GI Jahrestagung (2). Citeseer, S. 404–409.
- Borja, A.; Elliott, M.; Andersen, J. H.; Cardoso, A. C.; Carstensen, J.; Ferreira, J. G. et al. (2013): *Good Environmental Status of marine ecosystems: What is it and how do we know when we have attained it?* In: *Marine Pollution Bulletin* 76 (1), S. 16–27.
- Boyd, John R. (1987): *A discourse on winning and losing*: Unpublished set of briefing slides available at Air University Library, Maxwell AFB, Alabama.

- Brand, M.; Grawunder, M. (2015): *Using Odysseus for Real-time Analysis over High Volume Geospatial Data Streams*. In: Proceedings of the 9th ACM International Conference on Distributed Event-Based Systems. New York, NY, USA: ACM (DEBS '15), S. 320–321. DOI: 10.1145/2675743.2776760.
- Bundesnetzagentur (2016): *Frequenzplan gem.§ 54 TKG*. Stand April 2016. Hg. v. Bundesnetzagentur. Online verfügbar unter https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Telekommunikation/Unternehmen_Institutionen/Frequenzen/Frequenzplan.pdf?__blob=publicationFile&v=9, zuletzt geprüft am 25.06.2017.
- Burchard, H.; Flöser, G.; Staneva, J. V.; Badewien, T. H.; Riethmüller, R. (2008): *Impact of Density Gradients on Net Sediment Transport into the Wadden Sea*. In: *J. Phys. Oceanogr.* 38 (3), S. 566–587. DOI: 10.1175/2007JPO3796.1.
- Burghardt, Manfred H. (Hg.) (2012): *Projektmanagement*. Leitfaden für die Planung, Überwachung und Steuerung von Projekten. 9. Aufl. Erlangen: Publicis Publ.
- Burke, M. W. (2013): *Image acquisition*. Handbook of machine vision engineering: Springer.
- Calisti, M.; Carbonara, G.; Laschi, C. (2017): *A rotating polarizing filter approach for image enhancement*. In: Oceans-Aberdeen, 2017. IEEE., ISBN: 978-1-5090-5278-3/17.
- Collins, R.; Lipton, A.; Kanade, T.; Fujiyoshi, H.; Duggins, D.; Tsin, Y. et al. (2000): *A System for Video Surveillance and Monitoring*. Robotics Institute, Carnegie Mellon University. Pittsburgh, PA (CMU-RI-TR-00-12). Online verfügbar unter http://ri.cmu.edu/pub_files/pub2/collins_robert_2000_1/collins_robert_2000_1.pdf, zuletzt geprüft am 25.06.2017.
- Date, Chris J. (2004): *An introduction to database systems*. 8. ed. Boston, Mass.: Pearson Addison-Wesley.
- Dietrich, H.-A. (2008): *Performance Testing*. Seminar Software Engineering. Hg. v. Institut für Wirtschaftsinformatik. Westfälische Wilhelms-Universität Münster. Online verfügbar unter is.uni-muenster.de/pi/lehre/ws0809/SeminarSE/ausarbeitungen/Performance-Testing.pdf, zuletzt geprüft am 25.06.2017.

- Dijk, J.; Bijl, P.; van den Broek, S. P.; van Eijk, A. M. J. (2014): *Research topics on EO systems for maritime platforms*. In: David A. Huckridge und Reinhard Ebert (Hg.). SPIE Security + Defence. Amsterdam, Netherlands: SPIE (SPIE Proceedings, 9249), 92490M. DOI: 10.1117/12.2070420.
- Dramais, G.; Le Coz, J.; Camenen, B.; Hauet, A. (2011): *Advantages of a mobile LSPIV method for measuring flood discharges and improving stage–discharge curves*. In: *Journal of Hydro-environment Research* 5 (4), S. 301–312. DOI: 10.1016/j.jher.2010.12.005.
- Durst, Franz (Hg.) (2006): *Grundlagen der Strömungsmechanik*. Eine Einführung in die Theorie der Strömung von Fluiden. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.
- Feng, D.; Feng, M. Q. (2016): *Vision-based multipoint displacement measurement for structural health monitoring*. In: *Struct. Control Health Monit.* 23 (5), S. 876–890. DOI: 10.1002/stc.1819.
- Flora, K.: *Flood Flow Estimation using Large Scale Particle Image Velocimetry (LSPIV)*. Division of Maintenance, Caltrans. Online verfügbar unter http://www.dot.ca.gov/newtech/researchreports/preliminary_investigations/docs/flood_flow_pi_020817.pdf, zuletzt geprüft am 25.06.2017.
- Fofonoff, N. P.; Millard Jr, R. C. (1983): *Algorithms for the computation of fundamental properties of seawater*. Online verfügbar unter <http://www.oceandatapraactices.net/bitstream/handle/11329/109/059832eb.pdf?sequence=1&isAllowed=y>, zuletzt geprüft am 25.06.2017.
- Fujita, I.; Muste, M.; Kruger, A. (1998): *Large-scale particle image velocimetry for flow analysis in hydraulic engineering applications*. In: *Journal of hydraulic Research* 36 (3), S. 397–414.
- Gade, Martin; Hühnerfuss, Heinrich; Korenowski, Gerald M. (Hg.) (2006): *Marine Surface Films*. Chemical Characteristics, Influence on Air-Sea Interactions and Remote Sensing. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Garaba, S. P.; Schulz, J.; Wernand, M. R.; Zielinski, O. (2012): *Sun glint Detection for Unmanned and Automated Platforms*. In: *Sensors* 12 (12), S. 12545–12561. DOI: 10.3390/s120912545.

- Garaba, S. P.; Zielinski, O. (2013): *Methods in reducing surface reflected glint for shipborne above-water remote sensing*. In: *JEOS:RP* 8. DOI: 10.2971/jeos.2013.13058.
- Garbe, C. S.; Schimpf, U.; Jähne, B. (2004): *A surface renewal model to analyze infrared image sequences of the ocean surface for the study of air-sea heat and gas exchange*. In: *J. Geophys. Res.* 109 (C8), n/a-n/a. DOI: 10.1029/2003JC001802.
- Garcia, J.; Guerrero, J. L.; Luis, A.; Molina, J. M. (2010): *Robust sensor fusion in real maritime surveillance scenarios*. In: *Information Fusion (FUSION)*, 2010 13th Conference on. IEEE, S. 1–8.
- Garcia, J.; Molina, J. M.; Singh, T.; Crassidis, J.; Llinas, J. (2011): *Research Opportunities in Contextualized Fusion Systems. The Harbor Surveillance Case*. In: Joan Cabestany, Ignacio Rojas und Gonzalo Joya (Hg.): *Advances in computational intelligence. 11th International Work-Conference on Artificial Neural Networks*. Berlin: Springer (Lecture Notes in Computer Science, 6692), S. 621–628. DOI: 10.1007/978-3-642-21498-1_78, ISBN: 978-3-642-21497-4.
- Geesen, D.; Brell, M.; Grawunder, M.; Nicklas, D.; Appelrath, H.-J. (2012): *Data Stream Management in the AAL: Universal and Flexible Preprocessing of Continuous Sensor Data*. In: Reiner Wichert und Birgid Eberhardt (Hg.): *Ambient Assisted Living: 5. AAL-Kongress 2012 Berlin, Germany, January 24-25, 2012*: Springer Berlin Heidelberg, S. 213–228. DOI: 10.1007/978-3-642-27491-6_16, ISBN: 978-3-642-27491-6.
- Ghafoor, K. (2016): *Video Streaming over Vehicular Ad Hoc Networks. A Comparative Study and Future Perspectives*. In: *ARO* 4 (2), S. 25–36. DOI: 10.14500/aro.10128.
- Godding, R. (1993): *Ein photogrammetrisches Verfahren zur Überprüfung und Kalibrierung digitaler Bildaufnahmesysteme*. In: *Zeitschrift für Photogrammetrie und Fernerkundung* 2 (93), S. 82–90.
- Godding, R. (2002): *Geometrische Kalibrierung und Orientierung digitaler Bildaufnahmesysteme*. Hg. v. AICON 3D Systems GmbH. Online verfügbar

unter http://www.falcon.de/falcon/pdf/de/aicon/geometric_calibration.pdf,
zuletzt geprüft am 25.06.2017.

- Goslin, C. (2008): *Maritime and Port Security White Paper*. Hg. v. Inc Duos Technologies. Online verfügbar unter <http://codigopbip.com/sitio/images/PDFs/Articulos/WP-MaritimeAndPortSecurity.pdf>, zuletzt geprüft am 25.06.2017.
- Grachev, A. A.; Fairall, C. W.; Hare, J. E.; Edson, J. B.; Miller, S. D. (2003): *Wind stress vector over ocean waves*. In: *Journal of Physical Oceanography* 33 (11), S. 2408–2429.
- Graff, J. (2009): *e-Maritime*. A framework for knowledge exchange and development of innovative marine information services. In: *WMU J Marit Affairs* 8 (2), S. 173–201. DOI: 10.1007/BF03195159.
- Grashorn, S.; Lettmann, K. A.; Wolff, J.-O.; Badewien, T. H.; Stanev, E. V. (2015): *East Frisian Wadden Sea hydrodynamics and wave effects in an unstructured-grid model*. In: *Ocean Dynamics* 65 (3), S. 419–434.
- Grue, John; Liu, Philip L. F.; Pedersen, Geir K. (2004): *PIV and water waves*: World Scientific (9).
- Gucma, L.; Gućma, M.; Bać, A. (2010): *Pilot Docking System new Tool for Safe Maritime Operation*. Hg. v. Akademia Morska w Szczecinie. Online verfügbar unter http://www.logistyka.net.pl/bank-wiedzy/pozostale-zagadnienia/item/download/75679_2902c072396538d60017066a50a51e11, zuletzt geprüft am 25.06.2017.
- Gupta, K. M.; Aha, D. W.; Hartley, R.; Moore, P. G. (2009): *Adaptive maritime video surveillance*. In: *Proceedings of SPIE-09. International Society for Optics and Photonics* (vol 7346), S. 734609.
- Hahn, A. (2014): *Test Bed for Safety Assessment of New e-Navigation Systems**. In: *International Journal of e-Navigation and Maritime Economy* 1, S. 14–28. DOI: 10.1016/j.enavi.2014.12.003.
- Hahn, A.; Noack, T. (2016): *eMaritime Integrated Reference Platform*. Hg. v. Deutsche Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt - Lilienthal-Oberth e.V., Bonn, 2016. Online verfügbar unter

- <http://www.dglr.de/publikationen/2016/420297.pdf>, zuletzt geprüft am 25.06.2017.
- Hall, D. L.; Jordan, J. M. (2010): *Human-Centered Information Fusion*: Artech House.
- Hall, L., David; Llinas, J. (1997): *An introduction to multisensor data fusion*. In: *Proc. IEEE* 85 (1), S. 6–23. DOI: 10.1109/5.554205.
- Heilig, L.; Voß, S. (2016): *Information systems in seaports*. A categorization and overview. In: *Inf Technol Manag*. DOI: 10.1007/s10799-016-0269-1.
- Herrling, G.; Winter, C. (2015): *Tidally- and wind-driven residual circulation at the multiple-inlet system East Frisian Wadden Sea*. In: *Continental Shelf Research* 106, S. 45–59. DOI: 10.1016/j.csr.2015.06.001.
- Hoelter, T.; Meyer, B. (1998): *The challenges of using an uncooled microbolometer array in a thermographic application*. Hg. v. RAYTHEON CO. DTIC Document. Goleta, CA. Online verfügbar unter <http://www.dtic.mil/get-tr-doc/pdf?AD=ADA399432>, zuletzt geprüft am 25.06.2017.
- Holinde, L.; Badewien, T. H.; Freund, J. A.; Stanev, E. V.; Zielinski, O. (2015): *Processing of water level derived from water pressure data at the Time Series Station Spiekeroog*. In: *Earth Syst. Sci. Data* 7 (2), S. 289–297. DOI: 10.5194/essd-7-289-2015.
- Holman, R.; Stanley, J.; Ozkan-Haller, T. (2003): *Applying video sensor networks to nearshore environment monitoring*. In: *IEEE Pervasive Comput.* 2 (4), S. 14–21. DOI: 10.1109/MPRV.2003.1251165.
- Hu, W. H.; Xu, K. Y.; Shi, C. J. (2010): *Target Detection and Tracking Based on Ship Borne Infrared Imagery*. In: *Advanced Measurement and Test X*, Bd. 439: Trans Tech Publications (Key Engineering Materials), S. 546–551. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.439-440.546.
- Huang, H.; Dabiri, D.; Gharib, M. (1997): *On errors of digital particle image velocimetry*. In: *Meas. Sci. Technol.* 8 (12), S. 1427–1440. DOI: 10.1088/0957-0233/8/12/007.
- HUAWEI (2013): *B593s-931 LTE CPE V200R001*. Huawei. Online verfügbar unter <http://download->

c.huawei.com/download/downloadCenter?downloadId=19871, zuletzt geprüft am 25.06.2017.

IALA (2015): *IALA Recommendation e-NAV 140*. The Architecture for Shore-based Infrastructure 'fit for e-Navigation'. 2. Aufl. Hg. v. IALA. Online verfügbar unter <http://www.iala-aism.org/product/architecture-for-shore-based-infrastructure-fit-for-e-navigation-e-nav-140/?download=true>, zuletzt geprüft am 25.06.2017.

IMO (Hg.) (2008): *Report to the maritime safety committee*. Huntsville, AL, USA, 14.08. International Maritime Organisation (NAV 54/25).

Ince, A. Nejat.; Topuz, Ercan.; Panayirci, Erdal.; Isik, Cevdet. (2012): *Principles of Integrated Maritime Surveillance Systems*: Springer US.

IOC: *The International thermodynamic equation of seawater, 2010: calculation and use of thermodynamic properties; IOC. Manuals and guides; Vol.:56; 2010*. Unter Mitarbeit von IOC, SCOR und International Association for the Physical Sciences.

Irish Lights: *Dublin Bay Digital Diamond Data sheet*. e-Navigation demonstrator. Hg. v. Commissioners of Irish Lights, Ireland. Online verfügbar unter <http://www.irishlights.ie/media/41085/dbdd-data-sheet.pdf>, zuletzt geprüft am 25.06.2017.

ITU-T (Hg.) (2016): *AUDIOVISUAL AND MULTIMEDIA SYSTEMS Infrastructure of audiovisual services – Coding of moving video*. Advanced video coding for generic audiovisual services. ITU-T H.264 (V11). International Telecommunication Union (11.1002/1000/12904). Online verfügbar unter <http://handle.itu.int/11.1002/1000/12904>, zuletzt geprüft am 25.06.2017.

Jacobi, J.; Grawunder, M. (2008): *ODYSSEUS: Ein flexibles Framework zum Erstellen anwendungsspezifischer Datenstrommanagementsysteme*. In: *Grundlagen von Datenbanken 1*, S. 86–90.

Jähne, Bernd (2012): *Digitale Bildverarbeitung und Bildgewinnung*. 7., neu bearbeitete Aufl. 2012. Berlin, Heidelberg: Springer.

Jan Schulz et al. (2016): *Aquatische Optische Technologien in Deutschland*. In: *Meereswiss. Ber.*, 97(2015). DOI: 10.12754/msr-2015-97.

- Jimenez, A. R.; Ceres, R.; Seco, F. (2004): *A laser range-finder scanner system for precise manoeuver and obstacle avoidance in maritime and inland navigation*. In: Electronics in Marine, 2004. Proceedings Elmar 2004. 46th International Symposium. IEEE, S. 101–106.
- Jodeau, M.; Hauet, A.; Paquier, A.; Le Coz, J.; Dramais, G. (2008): *Application and evaluation of LS-PIV technique for the monitoring of river surface velocities in high flow conditions*. In: *Flow Measurement and Instrumentation* 19 (2), S. 117–127. DOI: 10.1016/j.flowmeasinst.2007.11.004.
- Joseph, Antony (2014): *Measuring ocean currents*. Tools, technologies, and data. 1. ed. Amsterdam: Elsevier.
- Karl, Holger; Willig, Andreas (2005): *Protocols and Architectures for Wireless Sensor Networks*. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd.
- Keve, G. (2016): *Space-Time Ice Monitoring of the Hungarian Lower-Danube*. In: *Period. Polytech. Civil Eng.* DOI: 10.3311/PPci.9116.
- Kim, S.; Lee, J. (2014): *Small infrared target detection by region-adaptive clutter rejection for sea-based infrared search and track*. In: *Sensors (Basel, Switzerland)* 14 (7), S. 13210–13242. DOI: 10.3390/s140713210.
- Kim, Y. (2006): *Uncertainty analysis for non-intrusive measurement of river discharge using image velocimetry*. Dissertation. University of Iowa 2006, United States - Iowa.
- Knagaard, A.; Bentzen, m. (2009): *A report on state-of-the-art e-Navigation concepts and solutions*. D4.1.1-1 International Organisations. Hg. v. EfficienSea. DaMSA (D_WP4_1_1). Online verfügbar unter http://efficiensea.org/files/mainoutputs/wp4/efficiensea_wp4_7.pdf, zuletzt geprüft am 25.06.2017.
- Krämer, J. (2007): *Continuous queries over data streams-semantics and implementation*. Dissertation. Philipps-Universität Marburg, Marburg. Fachbereich Mathematik und Informatik.
- Krämer, J.; Seeger, B. (2004): *PIPES: a public infrastructure for processing and exploring streams*. In: Proceedings of the 2004 ACM SIGMOD international conference on Management of data. ACM, S. 925–926.

- Kuenzer, Claudia; Dech, Stefan (Hg.) (2013): *Thermal Infrared Remote Sensing: Sensors, Methods, Applications*. Dordrecht: Springer Netherlands.
- Kuka, C. (2015): *Qualitätssensitive Datenstromverarbeitung zur Erstellung von dynamischen Kontextmodellen*. Dissertation. Universität Oldenburg, Oldenburg. Department für Informatik.
- Kuka, C.; Nicklas, D. (2014): *Supporting Quality-aware Pervasive Applications by Probabilistic Data Stream Management*. In: Proceedings of the 8th ACM International Conference on Distributed Event-Based Systems. New York, NY, USA: ACM (DEBS '14), S. 330–333. DOI: 10.1145/2611286.2611319.
- Kunz, G. J.; Bekman, H. H. P. T.; Benoist, K. W.; Coen, L. H.; van den Heuvel, J. C.; van Putten, F. J. M. (2005): *Detection of small targets in a marine environment using laser radar*. In: Robert J. Frouin, Marcel Babin und Shubha Sathyendranath (Hg.): Optics & Photonics 2005. San Diego, California, USA, Sunday 31 July 2005: SPIE (SPIE Proceedings), 58850F. DOI: 10.1117/12.614914.
- Künzner, N.; Kushauer, J.; Katzenbeißer, S. (2012): *An electro-optical sensor system for maritime surveillance*. In: SPIE Newsroom. DOI: 10.1117/2.1201204.004166.
- Kusnierek, K.; Korsath, A. (2014): *Challenges in using an analog uncooled microbolometer thermal camera to measure crop temperature*. In: *International Journal of Agricultural and Biological Engineering* 7 (4), S. 60.
- Le Coz, J.; Hauet, A.; Pierrefeu, G.; Dramais, G.; Camenen, B. (2010): *Performance of image-based velocimetry (LSPIV) applied to flash-flood discharge measurements in Mediterranean rivers*. In: *Journal of Hydrology* 394 (1-2), S. 42–52. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2010.05.049.
- Le Coz, J.; Jodeau, M.; Hauet, A.; Marchand, B.; Le Boursicaud, R. (2014): *Image-based velocity and discharge measurements in field and laboratory river engineering studies using the free FUDAA-LSPIV software*. In: River Flow, Proc. 7th Int. Conf. on Fluvial Hydraulics, Lausanne, Switzerland.
- Lee, J. (1991): *Analyses of visibility sites on topographic surfaces*. In: *International Journal of Geographical Information System* 5 (4), S. 413–429.

- Lim, K.-W.; Seo, Y.; Jung, W.-S.; Ko, Y.-B.; Park, S. (2013): *Design and implementation of adaptive WLAN mesh networks for video surveillance*. In: *Wireless Netw* 19 (7), S. 1511–1524. DOI: 10.1007/s11276-013-0547-3.
- Litfin, Gerd (2005): *Technische Optik in der Praxis (German Edition)*. Dordrecht: Springer.
- Llinas, J. (2010): *A Survey and Analysis of Frameworks and Framework Issues for Information Fusion Applications*. In: Manuel Graña Romay, Emilio Corchado und M. Teresa Garcia-Sebastian (Hg.): *Hybrid artificial intelligence systems. 5th international conference, HAIS 2010, San Sebastián, Spain, June 23 - 25, 2010 ; proceedings, part I, Bd. 6076*. Berlin: Springer (Lecture notes in computer science Lecture notes in artificial intelligence, 6076), S. 14–23. DOI: 10.1007/978-3-642-13769-3_2, ISBN: 978-3-642-13768-6.
- Luhmann, T.; Piechel, J.; Roelfs, T. (2013): *Geometric Calibration of Thermographic Cameras*. In: Claudia Kuenzer und Stefan Dech (Hg.): *Thermal Infrared Remote Sensing: Sensors, Methods, Applications*. Dordrecht: Springer Netherlands, S. 27–42. DOI: 10.1007/978-94-007-6639-6_2, ISBN: 978-94-007-6639-6.
- Mamun, Q. (2012): *A qualitative comparison of different logical topologies for Wireless Sensor Networks*. In: *Sensors (Basel, Switzerland)* 12 (11), S. 14887–14913. DOI: 10.3390/s121114887.
- Martins, A.; Dias, A.; Almeida, J.; Ferreira, H.; Almeida, C.; Amaral, G. et al. (2013): *Field experiments for marine casualty detection with autonomous surface vehicles*. In: *Oceans-San Diego, 2013*. IEEE, S. 1–5.
- Melodia, T.; Akyildiz, I. F. (2011): *Research challenges for wireless multimedia sensor networks*. In: *Distributed Video Sensor Networks*. London: Springer, S. 233–246.
- Microsoft TechNet (2017): *Windows Performance Monitor*. TechNet Subscription Support. Online verfügbar unter [https://technet.microsoft.com/en-us/library/cc749249\(v=ws.11\).aspx](https://technet.microsoft.com/en-us/library/cc749249(v=ws.11).aspx), zuletzt geprüft am 25.06.2017.
- Minkina, W.; Klecha, D. (2016): *Atmospheric transmission coefficient modelling in the infrared for thermovision measurements*. In: *J. Sens. Sens. Syst.* 5 (1), S. 17–23. DOI: 10.5194/jsss-5-17-2016.

- Monahan, E. C. (1971): *Oceanic whitecaps*. In: *Journal of Physical Oceanography* 1 (2), S. 139–144. Online verfügbar unter [http://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/1520-0485\(1971\)001%3C0139%3AOW%3E2.0.CO%3B2](http://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/1520-0485(1971)001%3C0139%3AOW%3E2.0.CO%3B2), zuletzt geprüft am 25.06.2017.
- Monahan, E. C.; O’Muircheartaigh, I. G. (1986): *Whitecaps and the passive remote sensing of the ocean surface*. In: *International Journal of Remote Sensing* 7 (5), S. 627–642.
- Moore, C.; Barnard, A.; Fietzek, P.; Lewis, M. R.; Sosik, H. M.; White, S.; Zielinski, O. (2009): *Optical tools for ocean monitoring and research*. In: *Ocean Sci.* 5 (4), S. 661–684. DOI: 10.5194/os-5-661-2009.
- Murphy, B. P. (2000): *Machinery monitoring technology design methodology for determining the information and sensors required for reduced manning of ships*. Thesis. Massachusetts Institute of Technology, Monterey, California. Naval Postgraduate School.
- Muste, M.; Kim, W.; Fulford, J. M. (2008): *Developments in hydrometric technology: new and emerging instruments for mapping river hydrodynamics*. In: *World Meteorological Organization (WMO) Bulletin* 57 (3), S. 163.
- Nakamura, E. F.; Loureiro, A. A. F.; Frery, A. C. (2007): *Information fusion for wireless sensor networks*. In: *ACM Comput. Surv.* 39 (3), 9-es. DOI: 10.1145/1267070.1267073.
- Naumann, S. (2013): *Anforderungsanalyse und -definition in der Entwicklung von Umweltinformationssystemen*. In: Peter Fischer-Stabel (Hg.): *Umweltinformationssysteme*. 2. Aufl. Heidelberg: Wichmann, S. 124–133, ISBN: 978-3-87907-517-1.
- NMEA (2002): *NMEA 0183 - Standard For Interfacing Marine Electronic Devices*. Version 3.01.
- NMMT Arbeitsgruppe (2015): *Positionspapier zur zivilen maritimen Sicherheit: Zukunftsinitiative "Securitas Maritima"*. Online verfügbar unter http://www.nmmt.de/download_document.phtml?file_id=YWFtYTA3N2Y%3D, zuletzt geprüft am 25.06.2017.

- NOAA: *The Challenge of Measuring Water Currents - NOAA Tides & Currents*. Hg. v. National Oceanic and Atmospheric Administration. Online verfügbar unter <https://tidesandcurrents.noaa.gov/meascurr.html>, zuletzt geprüft am 25.06.2017.
- Noack, T.; Baldauf, M.; Benedict, K.; Gluch, M. (2015): *Maritimer Kristallisationspunkt für Forschungs-, Entwicklungs- und Demonstrationsvorhaben mit GNSS Bezug*. Online verfügbar unter http://elib.dlr.de/90027/1/DLRK_2015_Paper_Forschungshafen_Rostock_Noack.pdf, zuletzt geprüft am 25.06.2017.
- Nugent, P. W.; Shaw, J. A. (2014): *Calibration of uncooled LWIR microbolometer imagers to enable long-term field deployment*. In: SPIE Defense+ Security. International Society for Optics and Photonics, 90710V-90710V. DOI: 10.1117/12.2053082.
- Nugent, P. W.; Shaw, J. A.; Pust, N. J. (2013): *Correcting for focal-plane-array temperature dependence in microbolometer infrared cameras lacking thermal stabilization*. In: *Optical Engineering* 52 (6), S. 61304.
- Optris (2012): *Grundlagen der berührungslosen Temperaturmessung*. Grundlagen-BR-D2017-03-A. Hg. v. Optris GmbH. Berlin. Online verfügbar unter http://www.optris.de/grundlagen-infrarot-temperaturmessung?file=tl_files/pdf/Downloads/Zubehoer/IR-Grundlagen.pdf, zuletzt geprüft am 25.06.2017.
- Orlov, Z.; Krüger, W.; Heinze, N. (2012): *Practical Results for Buoy-Based Automatic Maritime IR-Video Surveillance*. Hg. v. NATO (RTO-MP-SCI-247 AC/323(SCI-247)TP/456). Online verfügbar unter <https://www.sto.nato.int/publications/STO%20Meeting%20Proceedings/RTO-MP-SCI-247/MP-SCI-247-20.pdf>, zuletzt geprüft am 25.06.2017.
- OSGi Alliance (2007): *About the OSGi Service Platform*. Technical Whitepaper Revision 4.1; 7. June 2007. Online verfügbar unter <https://www.osgi.org/wp-content/uploads/OSGiTechnicalWhitePaper1.pdf>, zuletzt geprüft am 25.06.2017.

- Patalano, A.; Garcia, C. M. (2016): *RIVeR—Towards affordable, practical and user-friendly toolbox for Large Scale PIV and PTV techniques*. In: CRC Press (Hg.): *River Flow 2016*, S. 576–579.
- Pearlman, J.; Garello, R.; Delory, E.; Castro, A.; del Rio, J.; Mihai Toma, D. et al. (2014): *Requirements and approaches for a more cost-efficient assessment of ocean waters and ecosystems, and fisheries management*. In: OCEANS 2014. St. John's, NL, S. 1–9. DOI: 10.1109/OCEANS.2014.7003144.
- Pires, N.; Guinet, J.; Dusch, E. (2010): *ASV: an innovative automatic system for maritime surveillance*. In: *Navigation* 58 (232), S. 1–20.
- Planck, Max (1900): *Zur Theorie des Gesetzes der Energieverteilung im Normalspectrum. Vorgetragen in der Sitzung vom 14. December 1900*. Leipzig: J.A. Barth.
- Plass, S.; Clazzer, F.; Bekkadal, F.; Ibyahya, Y.; Manzo, M. (2014): *Maritime communications—Identifying current and future satellite requirements & technologies*. In: 20th Ka and Broadband Communications, Navigation and Earth Observation Conference.
- Prasad, D. K.; Prasath, C. K.; Rajan, D.; Rachmawati, L.; Rajabally, E.; Quek, C. (2017): *Maritime situational awareness using adaptive multi-sensor management under hazy conditions*. In: *arXiv preprint arXiv:1702.00754*.
- Ran, Q.-h.; Li, W.; Liao, Q.; Tang, H.-l.; Wang, M.-y. (2016): *Application of an automated LSPIV system in a mountainous stream for continuous flood flow measurements*. In: *Hydrol. Process.* 30 (17), S. 3014–3029. DOI: 10.1002/hyp.10836.
- Rasheed, Z.; Cao, X.; Shafique, K.; Liu, H.; Yu, L.; Lee, M. et al. (2008): *Automated visual analysis in large scale sensor networks*. In: Second ACM/IEEE International Conference on Distributed Smart Cameras (ICDSC). Palo Alto, CA, USA. Association for Computing Machinery; Institute of Electrical and Electronics Engineers; ACM/IEEE. Piscataway, NJ: IEEE, S. 1–10. DOI: 10.1109/ICDSC.2008.4635678.
- Rawat, P.; Singh, K. D.; Chaouchi, H.; Bonnin, J. M. (2014): *Wireless sensor networks. A survey on recent developments and potential synergies*. In: *J Supercomput* 68 (1), S. 1–48. DOI: 10.1007/s11227-013-1021-9.

- RD Instruments (2005): *WorkHorse Technical Manual P/N 957-6150-00 (April 2005)*.
- Reda, I.; Andreas, A. (2004): *Solar position algorithm for solar radiation applications*. In: *Solar energy* 76 (5), S. 577–589.
- Reuter, R.; Badewien, T. H.; Bartholomä, A.; Braun, A.; Lübben, A.; Rullkötter, J. (2009): *A hydrographic time series station in the Wadden Sea (southern North Sea)*. In: *Ocean Dynamics* 59 (2), S. 195–211. DOI: 10.1007/s10236-009-0196-3.
- Richardson, Iain E. G. (2010): *The H.264 advanced video compression standard*. 2nd ed. Chichester, West Sussex, UK: Wiley. Online verfügbar unter <http://site.ebrary.com/lib/academiccompletetitles/home.action>, zuletzt geprüft am 25.06.2017.
- Rodseth, o. J.; Kvamstad, B. (2009): *The role of digital communication technology in e-Navigation*. Hg. v. Marintek (280823.00.01). Online verfügbar unter <http://raga3.marintek.sintef.no/MiTS/resources/efforts-enav-com-v22.pdf>, zuletzt geprüft am 25.06.2017.
- 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 18. GMA/ ITG-Fachtagung Sensoren und Messsysteme 2016, S. 715–722. DOI: 10.5162/sensoren2016/P7.1.
- 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*. In: *J. Sens. Sens. Syst.* 6 (1), S. 37–52. DOI: 10.5194/jsss-6-37-2017.
- Rüssmeier, N.; Hahn, A.; Zielinski, O.: *Ocean surface water currents by large-scale particle image velocimetry technique*. OCEANS'17 MTS/IEEE. In: OCEANS 2017 - Aberdeen. DOI: 10.1109/OCEANSE.2017.8084843.
- Sabbah, S. (2012): *Remote sensing of gases by hyperspectral imaging*. System performance and measurements. In: *Opt. Eng* 51 (11), S. 111717. DOI: 10.1117/1.OE.51.11.111717.

- Schroeder, Andreas; Willert, Christian E. (Hg.) (2008): *Particle Image Velocimetry. New Developments and Recent Applications*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin/Heidelberg (Topics in Applied Physics, 112). Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-73528-1>.
- Schulz, A.-C.; Badewien, T. H.; Garaba, S. P.; Zielinski, O. (2016): *Acoustic and optical methods to infer water transparency at Time Series Station Spiekeroog, Wadden Sea*. In: *Ocean Sci.* 12 (6), S. 1155–1163. DOI: 10.5194/os-12-1155-2016.
- Schuster, Norbert; Kolobrodov, Valentin G. (2004): *Infrarotthermographie. 2., überarb. und erw. Aufl.* Weinheim: WILEY-VCH.
- Selbe, S. (2014): *Monitoring and Surveillance Technologies for Fisheries*. A Report for the Waitt Institute. Waitt Institute. Online verfügbar unter <http://waittinstitute.org/wp-content/uploads/2014/07/Waitt-Institute-Monitoring-and-Surveillance-Technologies-for-Fisheries.pdf>, zuletzt geprüft am 25.06.2017.
- Shah, M.; Javed, O.; Shafique, K. (2007): *Automated visual surveillance in realistic scenarios*. In: *IEEE MultiMedia* 14 (1). Online verfügbar unter <http://www.crcv.ucf.edu/papers/MMmagazine.pdf>, zuletzt geprüft am 25.06.2017.
- SICK AG (2015): *Operating Instructions Laser Measurement Sensors of the LMS100 Product Family* (8012471/YFA1/2015-07-06). Online verfügbar unter https://www.sick.com/media/dox/1/31/331/Operating_instructions_Laser_Measurement_Sensors_of_the_LMS1xx_Product_Family_en_IM0031331.PDF, zuletzt geprüft am 25.06.2017.
- Snidaro, L.; Vaci, L.; García, J.; Martí, E. D.; Jusselme, A.-L.; Bryan, K. et al. (2015): *A framework for dynamic context exploitation*. In: Information Fusion (Fusion), 2015 18th International Conference on. IEEE, S. 1160–1167.
- SoftEther VPN Project*. Online verfügbar unter <https://www.softether.org/>, zuletzt geprüft am 25.06.2017.

- Soloviev, Alexander; Roger Lukas (2014): *The Near-Surface Layer of the Ocean: structure, dynamics and applications*. 2. Aufl. Dordrecht: Springer Science & Business Media (48).
- Stanev, E. V.; Grayek, S.; Staneva, J. (2009): *Temporal and spatial circulation patterns in the East Frisian Wadden Sea*. In: *Ocean Dynamics* 59 (2), S. 167–181. DOI: 10.1007/s10236-008-0159-0.
- Stasch, A.; Hahn, A.; Bolles, A. (2014): *Labskaus*. A physical platform for e-maritime technology assessment. In: *Proceedings // INT-NAM 2014, 2st International Symposium on Naval Architecture and Maritime : 23-24 October 2014, Istanbul, Turkey*. Istanbul: Yıldız Technical Univ, S. 743–752, ISBN: 978-605-4-12332-2.
- Steinmetz, Ralf (2000): *Multimedia-Technologie: Grundlagen, Komponenten und Systeme*. 3., überarb. Aufl.: Springer.
- STEMMER IMAGING GmbH (2016): *Das Handbuch der Bildverarbeitung*. 2016/2017 (ISBN 978-3-00-051331-2).
- Stern, Melvin E. (1975): *Ocean circulation physics*. New York: Academic Press (International geophysics series, v. 19).
- Sun Microsystems (2009): *JSR-000224 Java™API for XML-Based Web Services (“Specification”)*. Online verfügbar unter http://download.oracle.com/otn-pub/jcp/jaxws-2.2-mrel3-evalu-oth-JSpec/jaxws-2_2-mrel3-spec.pdf?AuthParam=1498386173_e58acfb108edf9d07bbadae78f9937e5, zuletzt geprüft am 25.06.2017.
- Surm, H.; Rüssmeier, N.; Grawunder, M.; Nicklas, D.; Zielinski, O. (2016): *Experiences with Sensor-based Research for Critical, Socio-technical Systems*. In: *Proceedings of the 17th IEEE International Conference on Mobile Data Management (MDM)*, S. 214–219. DOI: 10.1109/MDM.2016.41.
- Szulwic, J.; Burdziakowski, P.; Janowski, A.; Przyborski, M.; Tysiąc, P.; Wojtowicz, A. et al. (2015): *Maritime Laser Scanning as the Source for Spatial Data*. In: *Polish Maritime Research* 22 (4). DOI: 10.1515/pomr-2015-0064.
- Tanwir, Savera; Perros, Harry G. (2014): *VBR video traffic models*. First edition. London, Hoboken, NJ: ISTE (FOCUS Series). Online verfügbar unter

<http://lib.myilibrary.com/detail.asp?id=621897>, zuletzt geprüft am 25.06.2017.

- Team Odysseus Project (2017): *Odysseus Data Stream Management and Complex Event Processing*. University of Oldenburg, Information Systems Group. Online verfügbar unter <http://odysseus.informatik.uni-oldenburg.de/index.php?id=76>, zuletzt geprüft am 25.06.2017.
- Teledyne RD Instruments (2011): *Acoustic Doppler Current Profiler Principles of Operation, P/N 951-6069-00 (January 2011)*. Teledyne RD Instruments.
- Tempelhahn, A.; Budzier, H.; Krause, V.; Gerlach, G. (2016): *Shutter-less calibration of uncooled infrared cameras*. In: *J. Sens. Sens. Syst.* 5 (1), S. 9–16. DOI: 10.5194/jsss-5-9-2016.
- Thielicke, W.; Stamhuis, E. J. (2014): *PIVlab – Towards User-friendly, Affordable and Accurate Digital Particle Image Velocimetry in MATLAB*. In: *Journal of Open Research Software* 2(1), S. 1202. DOI: 10.5334/jors.bl.
- Touma, J. E.; Klausutis, T. J.; Fessenden, M.; New, C.; Diel, D. D. (2010): *Precision multi-sensor optical navigation test-bed utilizing ground-truthed data set*. In: Position Location and Navigation Symposium (PLANS), 2010 IEEE/ION. IEEE, S. 1232–1237.
- TP-Link: *TL-WDR3600_V1_datasheet*. Online verfügbar unter http://static.tp-link.com/resources/document/TL-WDR3600_V1_datasheet.zip, zuletzt geprüft am 25.06.2017.
- Trivedi, M. M.; Gandhi, T. L.; Huang, K. S. (2005): *Distributed Interactive Video Arrays for Event Capture and Enhanced Situational Awareness*. In: *IEEE Intell. Syst.* 20 (5), S. 58–66. DOI: 10.1109/MIS.2005.86.
- Ubiquiti Networks: *PowerBeam PBE-5AC-500 Datenblatt*. Online verfügbar unter https://www.ubnt.com/downloads/datasheets/PowerBeam_ac/PowerBeam5ac_DS.pdf, zuletzt geprüft am 25.06.2017.
- Valčić, S.; Mrak, Z.; Gulić, M. (2016): *Analysis of advantages and disadvantages of existing maritime communication systems for data exchange*. In: *Pomorstvo: Scientific Journal of Maritime Research* 30 (1), S. 28–37.

- van der Meer, Freek D.; de Jong, Steven M. (Hg.) (2011): *Imaging spectrometry*. Basic principles and prospective applications. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers (Remote Sensing and Digital Image Processing, 4).
- WARD, R.; Barrie, G. (2010): *IHO S-100*. The Universal Hydrographic Data Model. International Hydrographic Bureau. Online verfügbar unter https://www.iho.int/mtg_docs/com_wg/TSMAD/TSMAD_Misc/S-100InfoPaper_FinalJan2011.pdf, zuletzt geprüft am 25.06.2017.
- Watson, John; Zielinski, Oliver (Hg.) (2013): *Subsea optics and imaging*. Oxford: WP Woodhead Publ (Woodhead Publishing Series in Electronic and Optical Materials, 46).
- Wehn, H.; Yates, R.; Valin, P.; Guitouni, A.; Bosse, E.; Dlugan, A.; Zwicka, H. (2007): *A distributed information fusion testbed for coastal surveillance*. In: 2007 10th International Conference on Information Fusion. Quebec City, QC, Canada, S. 1–7. DOI: 10.1109/ICIF.2007.4408089.
- Wellhausen, J.; Rüssmeier, N.; Schulz, J. (2017): *Cost Efficient Airborne Remote Sensing of the Wadden Sea*. In: Thomas Luhmann und Christina Schumacher (Hg.): *Photogrammetrie - Laserscanning - Optische 3D-Messtechnik*. Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2017. 1., Neuerscheinung. Berlin: Wichmann, H; Wichmann Verlag, S. 174–181, ISBN: 978-3-87907-625-3.
- White Jr., F. E. (1991): *Data fusion lexicon, joint directors of laboratories*. Naval Ocean Systems Center. San Diego (20100621258). Online verfügbar unter <http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a529661.pdf>, zuletzt geprüft am 25.06.2017.
- Winter, C. (2017): *Monitoring concepts for an evaluation of marine environmental states in the German Bight*. In: *Geo-Mar Lett* 37 (2), S. 75–78. DOI: 10.1007/s00367-017-0496-4.
- Yick, J.; Mukherjee, B.; Ghosal, D. (2008): *Wireless sensor network survey*. In: *Computer Networks* 52 (12), S. 2292–2330. DOI: 10.1016/j.comnet.2008.04.002.
- Zhang, D. (2015): *A multi-modal smart sensing network for marine environmental monitoring*. Dissertation. Dublin City University. School of Electronic Engineering.

- Zhang, Z.; Wang, X.; Fan, T.; Xu, L. (2013): *River surface target enhancement and background suppression for unseeded LSPIV*. In: *Flow Measurement and Instrumentation* 30, S. 99–111. DOI: 10.1016/j.flowmeasinst.2012.12.002.
- Zheng, H.; Chen, G.; Yu, L. (2010): *Video transmission over IEEE 802.11 n WLAN with adaptive aggregation scheme*. In: *Broadband Multimedia Systems and Broadcasting (BMSB), 2010 IEEE International Symposium on*. IEEE, S. 1–5.
- 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*. In: *Ocean Science* 5 (3), S. 329–349. DOI: 10.5194/os-5-329-2009.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1: Station eines maritimen Beobachtungssystems mit optischen Sensoren, Windsensor, AIS-Empfänger (Automatic Identification System) und Radar für die Erprobung und Demonstration von e-Navigations-Diensten an einer Wasserstraße (Cuxhaven, Deutschland)	3
Abbildung 1.2: Anwendungsbereiche und Aufgaben des Testfeldes im Bereich der Umwelt und Verkehrsbeobachtung	4
Abbildung 1.3: Struktur und Methodik der Thesis	13
Abbildung 2.1: Schritte für die Entwicklung einer Testfeldkonzepts. Anforderungen werden eruiert, auf Systemkomponenten abgebildet und ein Konzept abgeleitet.....	15
Abbildung 2.2: Entwicklung der grundlegenden Architektur von Video-Beobachtungssystemen. Die aktuelle dritte Generation mit lokaler Video-Prozessierung und bilateraler Kommunikation. Daten stehen mehreren Benutzern zur Verfügung, nach (Foresti et al. 2009)	16
Abbildung 2.3: Kommunikations-Kanal-Klassen nach (Rodseth und Kvamstad 2009) a) Land-Schiff sowie Schiff - Schiff Datenlinks (AIS, DSC, VHF, HF, MF) b) Satellit (GNSS, EPIRB, LRIT, SSAS, SafetyNET, AISSat) c) Kommerziell Land-Schiff (GSM, WiMax, WLAN) d) Kommerzielle Satelliten-services (Inmarsat, Iridium, VSAT) 17	17
Abbildung 2.4: Klassifizierung von Hafen-bezogenen Informationstechnologien nach (Heilig und Voß 2016).....	18
Abbildung 2.5: Konzept verteilter Testfeldsysteme (in Anlehnung an WSN), Kommunikationsinfrastruktur und Sensoren decken großflächige maritime Studienbereiche ab.....	19
Abbildung 2.6: Inhaltsdarstellung der Nutzerumfrage zur Ermittlung von Anforderungen im Bezug für sensorbasierte Experimentplattformen.....	20
Abbildung 2.7: Elektromagnetisches Spektrum und atmosphärische Fenster. Quelle: (Fischer-Stabel, 2005), s.81	25
Abbildung 2.8: Übersicht der Systemanforderungen für das Testfeld für optische Sensoren, zugeordnet zu Testfeld-Systemkomponenten	28
Abbildung 2.9: Grundlegende Komponenten der Hardwarearchitektur eines Testfeld-Sensorknotens.....	29
Abbildung 2.10: Schematische Übersicht des Testfeldkonzepts mit Sensor-Datenstrom- und Anwendungs-Ebene, auf Basis verteilter optischer Sensoren	35
Abbildung 3.1: Das JDL-Datenfusionsmodell nach (Hall, L., David und Llinas 1997).....	43

Abbildung 3.2: Übersicht kontextbasierte, adaptive Architektur, Fusionsschritte mit implementierten Level 1-4 JDL Prozessmodellschritten. Quelle: (Garcia et al. 2011).....	44
Abbildung 3.3: High-Level Testfeldarchitektur mit multiplen zusammenwirkenden Agent-Knoten (links); IF-Schleife innerhalb eines Knotens nach Observe, Orient, Decide, Act-Prinzip mit Feedback-Schleife (rechts). Quelle: (Wehn et al. 2007).....	46
Abbildung 4.1: Physische Architektur des Testfeldes mit verteilten Sensorknoten und Applikationen. Dargestellt sind Kontroll- sowie Datenfluss für die lokale Sensor-Ebene (Reale Welt, Simulation, Wiederholung) und globale Sensor-Ebene mit Umweltlagebild und bilateraler Kommunikation zur lokalen Sensorebene sowie der Anwendungsebene. Nach der gemeinsamen Veröffentlichung von (Surm et al. 2016)	51
Abbildung 4.2: Physische Netzwerkstruktur mit Sensoren und Sensorknoten mit jeweiligem lokalem Umweltlagebild. Die Kommunikation zwischen den Sensorknoten ermöglicht ein geteiltes globales Lagebild für Anwendungen, bzw. mehrere Nutzer. Nach (Nalbandyan et al. 2014).....	56
Abbildung 4.3: Vermaschte Netzwerktopologie des Testfelds mit lokalen WLAN und WLAN-Richtfunk (AirMax-Bridge) sowie optionalen Übertragungswegen über LTE	57
Abbildung 4.4: Übersicht von mobilen Sensorsystemknoten und Sensoren mit Funktionsbeschreibung im Testfeld (links). Rechts Darstellung von mehreren verteilten vernetzten Sensorsystemen im Testfeld mit Kommunikation von fusionierten Datenströmen und einem Basisknoten als Zentrale zur Anbindung von Internet bzw. eines Leitrechners.....	58
Abbildung 5.1: Spektrale Empfindlichkeitsbereiche elektrooptischer Sensoren; VIS- und IR-Kameras decken in Kombination ein weites elektromagnetisches Spektrum ab.....	59
Abbildung 5.2: Auswirkungen von radialsymmetrischer Verzeichnung illustriert an einem Quadrat. Kamera und Objektiv mit entsprechendem Sichtbereich und Brennweite (IFOV, f) sowie Distanz (d) zur projizierten (Objekt-) Ebene. Die Seiten erscheinen gekrümmt, da die Verzeichnung typischerweise mit der dritten Potenz zum Abstand vom Bildmittelpunkt wächst. Links: positive „Kissenförmige“, rechts: negative „Tonnenförmige“ Verzeichnung.....	61
Abbildung 5.3: Verzerrungskurven (radialsymmetrische Aberrationen dr als Funktion des Bildradius) von unterschiedlichen Objektiven für den visuellen Spektralbereich zeigen Verzeichnungen von 10 Pixel in den Bildmitten und über 50 Pixel in den Ecken (links). Verwendetes standardisiertes Messfeld für die Aufnahme von Referenzbildern zur Ermittlung der Kameraparameter (rechts).....	62
Abbildung 5.4: Radialsymmetrische Verzeichnung dr für unterschiedliche Objektive für den IR-Spektralbereich zeigen geringe Verzeichnungen unter 1 Pixel	

- (links). Zugehöriges Messfeld für die Ermittlung von Kameraparametern für den IR-Spektralbereich (rechts). Nach (Luhmann et al. 2013) 63
- Abbildung 5.5: Mobile autarke Sensorsysteme, ausgestattet mit visueller Kamera (rechts) sowie LIDAR Scanner (links) in einen Hafengebiet, bieten Energieversorgung, Schnittstellen und Kommunikation für dezentrale Beobachtungen maritimer Studiengebiete..... 66
- Abbildung 5.6: Blockschaltbild eines Sensorsystemknotens im Testfeld. Oben: Recheneinheit mit Speicher (CPU) und Schnittstellen, Kommunikationshardware sowie Energieversorgung für den autarken Betrieb. Unten: Interface für unterschiedliche Sensoren, Kommunikation und ext. Energieversorgung 67
- Abbildung 5.7: Datendurchsatz im Feldbetrieb für WLAN-Richtfunk über eine Entfernung von 600 m, mittels LAN Speed Testprogramm. Der Datendurchsatz für Rx (Receiver exchange) sowie Tx (Transmitter exchange) beträgt etwa 360 Mbit/s mit temporär installierten Antennen 69
- Abbildung 5.8: Vernetzung von geographisch- und physisch- getrennten Subnetzen mit mehreren Sensorsystemknoten mittels VPN-Bridge über Internet 70
- Abbildung 5.9: Architektur Odysseus Datenstrommanagement-System mit drei Ebenen: Sensor-, Datenstrom- und Anwendungs-Ebene. Quelle: (Appelrath et al. 2012)..... 77
- Abbildung 5.10: Exemplarisch Subscriber-PQL-Query im DSMS mit Source- und Sink- Transport- Protokoll- Daten- (TPD)-Handler-Definition (links). In diesem Beispiel für das Einlesen von Videodaten und einen Livestream einer visuellen Kamera im Testfeld. Exemplarischer Abfrageplan (Query-plan) mit mehreren Quellen (rechts), welche mit unterschiedlichen Abfragevorlagen verknüpft werden und als sink (Datensenke) für die Anwendungen zur Verfügung stehen..... 78
- Abbildung 5.11: Exemplarisch verteilte Datenstrom-Abfrageverteilung mit vier vernetzten, geographisch verteilten Sensorsystem-Netzwerkknotten in OdysseusNet mit einzelnen Prozessphasen, Partition, Modifikation und Allokation zur Generierung des globalen Weltmodells aus mehreren lokalen Weltmodellen 80
- Abbildung 5.12: Verarbeitungs- und Datenfusionsschritte im DSMS-Framework, ausgehend von der Sensor-Ebene über Vorverarbeitungsschritte und Feature Annotation zur lokalen Fusion als lokales Weltmodell im DSMS-Framework. Mehrere verteilte Prozesseinheiten (Sensorsystemknoten im Netzwerk) integrieren lokale Weltmodelle über Kommunikationsverbindungen (globale Sensorebene) zu einem Weltmodell auf der Anwendungsebene 81
- Abbildung 5.13: Oberfläche von Odysseus Studio IDE (Integrierte Entwicklungsumgebung), welche Client- und Serverfunktionen des DSMS-Framework im Testfeldsystem zu einem monolithischen Produkt vereint 85
- Abbildung 5.14: Grafische Oberfläche der Admin-Client Anwendung im Wiedergabemodus mit erfassten Szenen (globales Umweltlagebild) aus dem

- Studiengebiet des Hafens Bremerhaven, Geestemündung. Alle im Netzwerk verfügbaren Quellen der verteilten DSMS-Instanzen sind als Ressourcen für das globale Weltmodell verfügbar und werden in variablen Ansichten dargestellt 88
- Abbildung 5.15: Grafische Oberfläche der Admin-Client Anwendung zur Konfiguration von Aufnahmen von Sensordaten bzw. kompletter Szenarien 89
- Abbildung 5.16: Exemplarische Abfragegrafik für einen optischen Sensor (Infrarotkamera) mit zwei aktiven Protokollierungszweigen, die einen Verarbeitungsoperator teilen 90
- Abbildung 5.17: Beispiel von Metadaten einer Testfeld-Serverinstanz (links), diese werden jeweils für einen Einsatz bzw. Beobachtungs-szenario angelegt. Konfiguration einer Testfeldszene (rechts), definieren Karten, Links zu Instanzen und Darstellungseigenschaften für Wiederholungen oder Simulation von sensorbasierten Experimenten 91
- Abbildung 5.18: Übersicht von Sensorsystemressourcen für eine Datenstrom - verarbeitung und -übertragung von EO-Sensorinformationen im Testfeld. In der unteren Ebene EO-Sensoren als Datenquellen sowie verfügbare physische Ressourcen wie (Multi-) CPU, Speicher, I/O-Interface. Darüber liegend eine Datenverarbeitung mit einem Datenstrommanagementsystem und einer Multimediaprogrammbibliothek (FFmpeg). In der oberen Ebene die Datenübertragung zwischen mehreren Sensorsystemknoten in vollvermaschter oder kettenvermaschter Netzwerktopologie. Latenz, Durchsatz sowie Bandbreite sind in den einzelnen Ebenen des Testfeldsystems zu berücksichtigen 98
- Abbildung 5.19: Monitoring von repräsentativen Systemleistungsindikatoren von physischen Ressourcen einer vernetzten Testfeldinstanz (oben) aufgezeigt für unterschiedliche Systemzustände a) - j). Zugehörige Datenübertragungsraten von Videodatenströmen mittels Testfeldsystemeigenen autonomen WLAN (unten) 99
- Abbildung 5.20: Bildgruppe (Group of Pictures, GOP) für eine H.264 / MPEG-4 Komprimierung eines Videodatenstroms, Beispiel für: Intra-Coded Picture (I-Frame), Bidirectionally Predictive-Coded Picture (B-Frame, zwischenberechnet und stark komprimiert), Predictive-Coded Picture (P-Frame gering komprimiert). Datenstromdarstellungs- / Übertragungsreihenfolge, erfordern jeweils einen virtuellen Puffer bei der Codierung sowie Encodierung des Videodatenstromes 102
- Abbildung 6.1: Geographische Lage und Position des Studiengebietes für stationäre Beobachtung mit Hafenbereich, Innenhafen und vorgelagerter Wasserstraße (Weser) in Bremerhaven (oben). Übersicht des Testfeldgebietes mit verteilten Sensorsystemen im Studiengebiet Hafen Bremerhaven Geestemündung (unten), die Sichtbereiche der optischen Sensoren sind durch Teilkreise hervorgehoben. Im unteren Bild weiter ersichtlich, Fähranleger (oben), Doppelschleuse (rechts) und die Hafeneinfahrt (unten)..... 113

- Abbildung 6.2: Livepräsentation von funkübertragenen Datenströmen auf der Brücke des Forschungsschiffs Heincke. Visuelle Kamera auf der linken Bildschirmseite, LIDAR-Scanner auf der rechten Bildschirmseite 115
- Abbildung 6.3: Testfeld mit schiffsgestütztem Sensorsystem-Setup und Sichtfeld (FOV) auf dem Forschungsschiff Senckenberg; LIDAR-Scanner und visuelle Kamera jeweils an Backbord- und Steuerbordseite; Visuelle- und Infrarot-Kamera auf der Backdeckebene in Fahrtrichtung ausgerichtet und zur Wasserfläche geneigt 117
- Abbildung 6.4: Anlegeassistentz-Applikation, Livedarstellung im Admin- Client mit Weitwinkelkameras (oben); zugehörige erfasste LIDAR Daten werden auf der MAP (Schiffumriss) dargestellt, rechts GPS Metadaten. LIDAR Daten der Kaianlage (Jade Weser Port) während eines Anlegemanövers (unten, links). Abbildung des Zugehörigen schiffstragenen LIDAR-Sensors auf steuerbord Arbeitsdeck (unten, rechts)..... 118
- Abbildung 6.5: Person über Bord Manöver, beobachtet durch schiffgetragene optische Sensoren. Visuelles Videobild (links) und Infrarot-pseudofarben Videobild (rechts) 120
- Abbildung 6.6: Sicht der Visuellen- und thermalen Infrarot-Kamera (Falschfarbenbild) im Testfeldgebiet des „Forschungshafens“ (obere Position in Abbildung 6.1, unten), gegenüberliegend die Hafeneinfahrt sowie rechts Fähranleger. ROI in IR-Videobild mit definierten Messregionen für eine Meerwasser-Oberflächentemperatur-Untersuchung (links, unten) und das korrespondierende Zeit- Temperaturprofil für den Hafensbereich sowie der Wasserstraße (rechts, unten)..... 123
- Abbildung 6.7: Durchschnittstemperatur-Zeitverlauf der Meerwasser Oberfläche, aufgenommen mit einer Infrarotkamera (identische Konfiguration wie in Abbildung 6.3) während einer offshore Kampagne im Bereich vom Jade-Weser Port, Deutschland (oben) und visuelle Videobilder der jeweiligen zugehörigen Szenen 125
- Abbildung 6.8: Testfeld für die Umweltlagebilderstellung als Demonstrator mit paralleler Anzeige einer Umgebungskarte (linke Anzeige), einer aufgezeichneten Studienszene aus aufgezeichneten Daten (mittlere Anzeige) sowie Live-Daten (rechte Anzeige) aus der direkten Umgebung 127
- Abbildung 6.9: Beispiele von direkter Sonneneinstrahlung, Oberflächenreflexionen und Sonnenglitzern in unterschiedliche EO- Sensoren, visuelle Kamera (links), Reflexionen der Sonne und des Himmels an der Meeresoberfläche aus der gleichen Szene im infrarot-graustufen Bild (rechts) 129
- Abbildung 7.1: Räumliche Abdeckung und zeitliche Auflösung / Einsatzzeitraum potentieller Trägerplattformen für optische Messsensoren sowie in situ Referenzmesssysteme zur Beobachtung von Meeressoberflächenströmungen. Nach Angaben von (Fischer-Stabel 2005), S:82 133
- Abbildung 7.2: Funktionsprinzip eines Acoustic Doppler Current Profilers (Teledyne RDI ADCP-Konfiguration). Links: vom schiffstragenen Messsystem

- ausgehende divergente Schallstrahlprofile. Rechts: Strömungsprofil als Messdatenausgabe, farblich markiert, nicht messbare Bereiche in der Nähe der Meeresoberfläche sowie in der Nähe des Meeresbodens, adaptiert nach (Muste et al. 2008) 134
- Abbildung 7.3: Vertikales Zeit-Strömungsprofil über einen Tidenzyklus, parallel zu LSPIV-Messungen aufgenommen, mit einem Schiffsgetragenen, nach unten gerichteten ADCP, rote Linien markieren nicht messbare Bereiche in der Nähe der Meeresoberfläche sowie in der Nähe des Meeresboden..... 135
- Abbildung 7.4: Geographische Lage und Position des Studiengbietes sowie der Dauermessstation Spiekeroog (roter Punkt) im Rückseitenwatt der vorgelagerten ostfriesischen Inseln, südlichen Nordsee (oben). Luftbildaufnahme des natürlichen Strömungskanals mit TSS (schwarzer Pfeil) vor der Insel Spiekeroog bei Niedrigwasser (unten) 137
- Abbildung 7.5: Simulationsergebnisse von stündlich auftretenden Schattenwurf der TSS (links), Sonnenpfad am 2016-05-18 (Zenit- und Azimutwinkel). Ein weißer Rahmen veranschaulicht den Südwest orientierten Kamerasichtbereich für die Fernerkundungsbeobachtungen der Meeresoberfläche. Luftbildaufnahme der Zeitserienstation und deren Schattenwurf (rechts), 2017-03-22, 12:00 UTC 138
- Abbildung 7.6: Systemaufbau des Testfeldes sowie der in situ Referenzmesssysteme im offshore Studiengbiet. Zeitserienstation mit optischen Sensoren am oberen rechten Ausleger und Ultraschallsensoren zur Abstandsmessung am linken Ausleger. Kleines Bild: Schiffsgestützte in situ Messungen mit ADCP, RHCM und CTD, verankert in unmittelbarer Nähe des LSPIV-Observationsbereiches..... 139
- Abbildung 7.7: Offshore stationiertes Testfeld, grafische Oberfläche des Admin- Clients zur kontinuierlichen Aufzeichnung von Videodaten der Meerwasser-Oberfläche (links visuell, rechts infrarot) sowie Metadaten auf der Dauermessstation Spiekeroog 140
- Abbildung 7.8: Gezeitenabhängiger Wasserspiegel (MSL) mit halbtägigen Gezeitenzyklen und Tidenhub im Bereich von ca. 2,2 m (oben), abgeleitet von TSS-Messungen mittels Ultraschallsensor. Berechneter entsprechender Kamera FOV (unten, linke Achse) sowie orthorektifizierte reale Weltentfernung (IFOV) pro Kamerapixel d_x , d_y , (unten, rechte Achse)..... 141
- Abbildung 7.9: Ablauf im Flussdiagramm des entwickelten LSPIV Messverfahrens, geeignet für Langzeitbeobachtungen, beginnend mit der Datenaufnahme, qualitätsorientierter LSPIV-Analyse und Nachbearbeitung sowie Datenausgabe 145
- Abbildung 7.10: Systematik für Abtastintervall und Abtastrate zwischen mehreren Videoframes während der Indexierung zur weiteren LSPIV-Analyse..... 146
- Abbildung 7.11: Sichtbereich der visuellen Kamera und Meeresoberflächenbedingungen bei der TSS mit natürlichen Schaumtracern sowie Wellentracer (ersichtlich im kleinen Bild). Das gesamte Videobild ist

- mit einem LSPIV-Vektorfeld kombiniert. Kleines Bild: ROI für ungestörte Strömungsverhältnisse der Meeresoberfläche der Szene mit LSPIV-Vektorfeld für die Langzeitbeobachtung..... 147
- Abbildung 7.12: Beispiel für verschiedene Meeresoberflächen-Signaturen im sichtbaren Wellenlängenbereich für eine Kamerazeile, wie sie für LSPIV-Vorverarbeitungsfiler von 8-bit-Graustufenbilder des ROI in Abbildung 7.11 auftreten (oben). Die Graustufenwerte zeigen Schaum mit schmalbandigen, hohen Intensitätssignaturen sowie Wellenstrukturen als kleine breitbandige Intensitätssignaturen. Histogramm des identischen Bildes und dessen Graustufenwerteverteilung für Wellenstrukturen und Schaum (unten) 149
- Abbildung 7.13: Strömungsgeschwindigkeits-zeitreihen (gemittelt) und Standardabweichungen, beobachtet durch LSPIV-Analyse, RHCM und ADCP in situ Sensoren. Die eingehende Sonnenbestrahlungsstärke aufgenommen an der LSPIV-Kameraposition, dargestellt durch E_d , (Mittelwert 400 - 700 nm), zeigt verfügbare Umgebungsbeleuchtung und Fluktuation im Tagesverlauf..... 153
- Abbildung 7.14: Vergleich von RHCM gemessener und korrelierende LSPIV analysierter Geschwindigkeiten. Die im 45° verlaufende schwarze Linie repräsentiert identische RHCM und LSPIV Daten. Kleine Punkte repräsentieren den Zeitbereich bis 11:20 UTC, große Punkte darauffolgender Zeitbereich. Die farbcodierten LSPIV Daten zeigen die vorliegende eingehende Bestrahlungsstärke E_d der Umgebung..... 155
- Abbildung 7.15: Windgeschwindigkeit und Windrichtung beobachtet an der TSS 12 m über NN der Meeresoberfläche (oben), zeigen mäßige bis ruhige Bedingungen während der fernerkundungs- und in situ- Messungen. Unten: Strömungsgeschwindigkeit (rot) sowie Strömungsrichtung (schwarz) an der Meeresoberfläche mittels LSPIV-Analyse. ADCP in situ Daten der Strömungsrichtung für den Mittelwert der ersten 5 Zellen (blau)..... 157
- Abbildung 7.16: Gegenüberstellung von Strömungsrichtungen von ADCP in situ Daten (für die ersten 5 Bins) und LSPIV-Daten zeigten eine gute Korrelation. Die vorwiegende Strömungsrichtung für auflaufendes Wasser ($\sim 284^\circ$) und ablaufendes Wasser ($\sim 104^\circ$) wird durch eine hohe Datendichte erkenntlich 158
- Abbildung A.1: Potentielle Schritte zur Implementierung von e-Navigation Services Quelle: (IMO 2008) 170
- Abbildung D.1: Schwarzer Graph mit IFOV (Pixel auf Kameramatrix mit $5,5 \mu\text{m}$ Pixelgröße) für eine Objektdimension $G_{x,y}$ von 1 m, aufgetragen gegen die Objektentfernung auf der linken Achse. Rechte Achse (roter schraffierter Graph) mögliche Objektdimension im Bezug zur Objektentfernung unter der Voraussetzung der Belegung von 3×3 IFOV (Pixel auf der Kamera CCD)..... 176
- Abbildung E.1: Temperaturverlauf während des Temperatur-Stabilitätstests der IR-Kamera (oben), für die interne Gerätetemperatur (pink), die FPA-

Sensormatrix (blau), einem 5×5 Pixel Messpunkt am äußeren Rand der FPA-Sensormatrix (rot) und einem 5×5 Pixel Messpunkt in der Mitte der FPA-Sensormatrix (schwarz), zeigt ein Einschwingverhalten während der Aufwärmphase. Unten: NCU (non uniformity-correction) Temperatur-Koeffizientenmatrix des IR-Kamerabildes zeigt projektionsabhängige radiometrische Verzeichnungen	178
Abbildung F.1: Graph mit IFOV (Pixel auf IR-Kameramatrix mit $25 \mu\text{m}$ Mikrobolometer FPA) für eine Objektdimension $G_{x,y}$ von 1 m, aufgetragen gegen die Objektentfernung auf der linken Achse (durchgehende Graphen). Rechte Achse (schraffierte Graphen) mögliche Objektdimension im Bezug zur Objektentfernung unter der Voraussetzung der Belegung von 3×3 IFOV (Pixel des Bolometer-FPA)	179

Tabellenverzeichnis

Tabelle 5.1: Zusammenfassung verwendete „Basissensoren“ in Testfeld	65
Tabelle G.1: Unsicherheiten LSPIV Verfahren. Nach einer Studie von Kim 2006.	180

Symbole

$A_{(i, j)}$	Abfragebereich Videoframe A
A1, A2, A3	Polynomkoeffizienten; Radial-symmetrische Verzeichnungsparameter
AOF	Kameraobjektivöffnungswinkel
$B_{(i, j)}$	Abfragebereich Videoframe B
B1, B2	Radial-asymmetrische (tangente) Verzeichnungsparameter
C	Gerätespezifische Konstante
$C_{(m, n)}$	Kreuzkorrelationsmatrix
C1	Affinitätsparameter intrinsische Verzeichnungskorrektur
C2	Scherung, Parameter intrinsische Verzeichnungskorrektur
Ck	Brennweite
d	Distanz zu einem Objekt bei perspektivischer Projizierung
Δh	Höhendifferenz
dr	Radialsymmetrische Aberrationen
d_{rsym}	Radialsymmetrische Verzeichnungskorrektur
d_T	Temperaturdifferenz
Δt	Zeitintervall einer Messung
D_x	Horizontalen Bildebene, abgebildet auf alle Pixel
d_x	Horizontalen Bildebene, abgebildet auf einen Pixel
D_y	Vertikale Bildebene, abgebildet auf alle Pixel eines optischen Sensors
d_y	Vertikale Bildebene, abgebildet auf einen Pixel eines optischen Sensors
Δz	Vertikale Auflösung
e	Element
E_d	Sonnenbestrahlungsstärke
ε	Emissionsgrad
f	Brennweite
GOP	Group Of Pictures, Bildgruppe eines Videostreams
GVSP	GigE Vision Streaming Protokoll
$G_{x, y}$	Objektdimension der Dimension x, y; Abmessungen eines Objektes
Ifov	Teilausschnitt eines Bildbereiches; Maskengröße
λ	Wellenlänge
r	Bildradius
r_0	Zweiter Nulldurchgang der Verzeichnungskurve
R^2	Bestimmtheitsmaß

R_s	Reflexionsgrad
R_x	Receiver exchange, Funktechnik Datendownload
T_{amb}	Temperatur der Hintergrundstrahlung
t_e	Gültigkeitsendzeitstempel
tick	Relative Systemzeit, Transferzeiteinheit (Gigabit Ethernet)
θ_s	Zenitwinkel der Sonne
T_{obj}	Objekttemperatur
T_{pyr}	Gerätetemperatur
t_s	Gültigkeitsstartzeitstempel
T_x	Transmitter exchange, Funktechnik Datenupload
U	Spannung, elektrische Signal am Detektor
VBR	Variable bitrate in der Videocodierung
VBV	Virtuelle Puffergröße (Video Buffering Verifier)
Xh	Bildhauptpunkt, x-Ebene
Yh	Bildhauptpunkt, y-Ebene
[t_s , t_e)	Gültigkeitsintervall

Danksagung

Meinen herzlichen Dank möchte ich Prof. Dr. Zielinski und Prof. Dr.-Ing. Axel Hahn für die gute und stets verbundene Betreuung sowie Förderung meiner Promotion aussprechen. Mit ihrer Unterstützung haben sie mir die Möglichkeit gegeben, meine Ideen in einem stimulierenden Forschungs- und Arbeitsumfeld in die Tat umsetzen zu können.

Für die weitere Unterstützung meiner Promotion geht mein Dank an Prof. Dr. Martin Fränzle und apl. Prof. Dr.-Ing. Jürgen Sauer sowie Dr. Sebastian Fudickar und Dr.-Ing. Johannes Piechel.

Vielen Dank auch an meine weiteren Co-Autoren, Prof. Dr. Daniela Nicklas, Prof. Dr.-Ing. Jens Wellhausen, Dr. Jan Schulz, Dr. Marco Grawunder und Henrik Surm, mit denen ich interessante wiss. Artikel, Forschungsexpeditionen und Konferenzen gestalten durfte.

Bedanken möchte ich mich weiterhin bei den vielen netten und hilfsbereiten Kollegen vom ICBM und OFFIS. Hier sind besonders zu nennen das Team rund um Helmo Nicolai für dessen großartiges Engagement bei den Feldexperimenten sowie Axel Braun und Dr. Thomas Badewien für die freudige, effektive Zusammenarbeit und Hilfsbereitschaft.

Nicht zu vergessen, vielen Dank an die Kapitäne und Mannschaften von den Forschungsschiffen Sonne, Heincke, Senckenberg und Otzum für ihre Unterstützung bei den Expeditionen.

Abschließend möchte ich meiner Familie für ihr Verständnis und ihre Rücksichtnahme danken. Meinen lieben Eltern für die immerwährende Unterstützung.

– Meiner lieben Frau Antje, und Phil und Hannah danke, dass Ihr für mich da seid –
– Diese Arbeit widme ich euch –

Wissenschaftlicher Lebenslauf

Persönliche Daten

Name Rüssmeier, Nick
 Staatsangehörigkeit Deutsch
 Geburtsdaten 30.04.1979, Delmenhorst
 Familienstand Verheiratet, 2 Kinder



Ausbildung

09/85 – 06/95 **Schulbildung**

08/95 – 01/99 **Elektrotechnische Ausbildung**, Gesellenbrief

09/99 – 07/00 **Fachhochschulreife**, Fachoberschule Technik, Delmenhorst

09/02 – 06/06 **Studium Umweltverfahrenstechnik**, Wilhelmshaven
Diplomarbeit, Fa. Optimare „Überwachung der Abbauleistung von Bioreaktoren zur Reinigung von Kohlenwasserstoff-kontaminiertem Wasser mittels Fluoreszenzspektroskopie“. Note „sehr gut“, Diplomabschlussnote „gut“.

07/06 – 01/14 **Diplom Ingenieur**, Forschung und Entwicklung

02/14 – 12/17 **Wissenschaftlicher Mitarbeiter**, Universität Oldenburg
 Institut für Chemie und Biologie des Meeres (ICBM).
 Arbeitsgruppe Marine Sensorsysteme

09/15 – 12/17 **Dissertation Universität Oldenburg**
Thesis, „Testfeld für optische Sensoren zur Erstellung von maritimen Umweltlagebildern und optischer Strömungsmessung“.
 Doktorvater, Prof. Dr. Zielinski; Institut für Chemie und Biologie des Meeres & Prof. Dr.-Ing. Axel Hahn; Department für Informatik.

Publikationsverzeichnis des Autors

Im Laufe meiner Arbeit als Entwicklungsingenieur in der Industrie und durch die wissenschaftliche Tätigkeit in der Arbeitsgruppe Marine Sensorsysteme an der Universität Oldenburg ergaben sich Interessante F&E Projekte. Im folgendem möchte ich dem Leser eine chronologische Übersicht der damit verbundenen Veröffentlichungen geben. Das Portfolio reicht dabei vom Nachweis von gelösten MKW Rückständen in Bioreaktoren, über Echtzeitbeobachtung des chemischen und kinetischen Verhaltens von CO₂ während der geologischen Speicherung, der Unterwasser-Lichtfeldmessung, den Nachweis von sicherheitskritischen Substanzen an schwer zugänglichen Orten und optische Messverfahren in der marinen Umwelt.

Rüssmeier, N. (2006): *Überwachung der Abbauleistung von Bioreaktoren zur Reinigung von Kohlenwasserstoffkontaminiertem Wasser mittels Fluoreszenzspektroskopie*, Diplomarbeit, Wilhelmshaven.

Schultze, R. H.; Laudien, R.; Rüssmeier, N.; Wieser, J.; Walte, A.; Pütz, A.; Rittgen, J.; Schulte-Ladbeck, R.; Schramm, E.; Hölzer, J.; Schindler, S.; Törber, G.; McNeish, A.; Ries, H.; Schall, P.; Dantl, T.; Heindl, T.; Ulrich, A.; Ehlert, S.; Sklorz, M.; Zimmermann, R. (2010): *The Project SAFE Inside - Trace Detection of security-relevant Substances by Single Photon Ionization Ion Trap Mass Spectrometry (SPI-ITMS)*, Proceedings of the 5th Security Research Conference, Berlin, September 7th - 9th, 2010, Hrsg.: Fraunhofer VVS, Freiburg, Fraunhofer Verlag, 2010, CD-ROM. - 978-3-8396-0159-4.

Schulz, J.; Möller, K. O.; Bracher, A.; Hieronymi, M.; Cisewski, B.; Zielinski, O.; Voss, D.; Gutzeit, E.; Dolereit, T.; Niedzwiedz, G.; Kohlberg, G.; Schories, D.; Kiko, R.; Körtzinger, A.; Falldorf, C.; Fischer, P.; Nowald, N.; Beisiegel, K.; Martinez-Arbizu, P.; Rüssmeier, N.; Röttgers, R.; Büdenbender, J.; Jordt-Sedlazeck, A.; Koch, R.; Riebesell, U.; Iversen, M.; Köser, K.; Kwasnitschka, T.; Wellhausen, J.; Thoma, C.; Barz, K.; Rhode, S.; Nattkemper, T. W.; Schoening, T.; Peeters, F.; Hofmann, H.; Busch, J.; Hirche, H. J.; Niehoff, B.; Hildebrandt, N.; Stohr, E.; Winter, C.; Herbst, G.; Konrad, C.; Schmidt, M.; Linke, P.; Brey, T.; Bange, H. W.; Nolle, L.; Krägefsky, S.; Gröger, J.; Sauter, E.; Schulz, M.; Müller, J.; Rehder, G.; Stepputtis, D.; Beszteri, B.; Kloster, M.; Kauer, G.; Göritz, A.; Gege, P.; Freiherr von Lukas, U. and Bathmann, U. V. (2015): *Aquatische Optische Technologien in Deutschland*, Marine Science

Reports - Meereswissenschaftliche Berichte, 97 , pp. 1-83 . doi: 10.12754/msr-2015-97.

Rüssmeier, N.; Zielinski, O. (2016): *A novel method of measuring upwelling radiance in the hydrographic sub-hull.* Journal of the European Optical Society - Rapid Publications, 11, 16003. DOI 10.2971/jeos.2016.16003.

Surm, H.; Rüssmeier, N.; Grawunder, M.; Nicklas, D.; Zielinski, O. (2016): *Experiences with Sensor-based Research for Critical, Socio-technical Systems.* in: Proceedings of the 17th IEEE International Conference on Mobile Data Management (MDM), pp.214-219; ISBN 978-1-5090-0883-4; doi:10.1109/MDM.2016.41.

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 18. GMA/ITG-Fachtagung Sensoren und Messsysteme 2016, pp. 715–722 (2016); doi:10.5162/sensoren2016/P7.1.

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.* In: J. Sens. Sens. Syst. 6 (1), S. 37–52. DOI: 10.5194/jsss-6-37-2017.

Wellhausen, J.; Rüssmeier, N.; Schulz, J. (2017): *Cost Efficient Airborne Remote Sensing of the Wadden Sea.* In Thomas Luhmann, Christina Schumacher (Eds.): Photogrammetrie - Laserscanning - Optische 3D-Messtechnik. Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2017. 1., Neuerscheinung. Berlin: Wichmann, H; Wichmann Verlag, S. 174–181; ISBN 978-3-87907-625-3.

Badewien, T. H.; Winkler, H.; Rüssmeier, N.; Braun, A.; Simon, M.; Zielinski, O. (2017): *Konstruktion und Einsatz einer neuen CTD-Rosette im Pazifik zwischen 30°S und 59°N.* In: Statusseminar Meeresforschung mit FS Sonne (Schriftenreihe Projektträger Jülich), S. 177–179, ISBN: 978-3-95806-207-8.

Rüssmeier, N.; Hahn, A.; Zielinski, O. (2017): *Ocean Surface Water Currents by Large-Scale Particle Image Velocimetry Technique.* OCEANS'17 MTS/IEEE. in: OCEANS 2017 - Aberdeen. DOI: 10.1109/OCEANSE.2017.8084843.

Ehrenwörtliche Erklärung zu meiner Dissertation mit dem Titel „Testfeld für optische Sensoren zur Erstellung von maritimen Umweltlagebildern und optischer Strömungsmessung“

Hiermit erkläre ich das ich die vorliegende Dissertation selbstständig verfasst habe und keinen anderen als die angegebenen Hilfsmittel genutzt habe. Alle wörtlich oder inhaltlich übernommenen Stellen habe ich als solche gekennzeichnet.

Oldenburg den 05.07.2017

A handwritten signature in black ink, reading "Nick Rüssmeier", written over a horizontal line.

Nick Rüssmeier