

## **Forschungsvorhaben : 03F0479I**

# **MAPS-IR: Entwicklung, Validierung und Ersteinsatz eines auf Infrarot-Sensoren basierenden Systems zur automatischen Detektion von Walen im Umfeld von Schiffen und Plattformen**

von

Olaf Boebel, Daniel P. Zitterbart, Lars Kindermann, Annette Bombosch und Elke Burkhardt

ALFRED-WEGENER-INSTITUT  
HELMHOLTZ-ZENTRUM FÜR POLAR- UND MEERESFORSCHUNG  
AM HANDELSHAFEN 12, 27570 BREMERHAVEN

Gefördert durch  
das Bundesministerium für Bildung und Forschung

April 2014

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 03F0479I gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

## Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN DOI: 10.1371/journal.pone.0071217	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht	
3. Titel des Vorhabens MAPS-IR: Entwicklung, Validierung und Ersteinsatz eines auf Infrarot-Sensoren basierenden Systems zur automatischen Detektion von Walen im Umfeld von Schiffen und Plattformen Titel der Publikation Automatic Round-the-Clock Detection of Whales for Mitigation from Underwater Noise Impacts		
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Boebel, Olaf; Bombosch, Annette; Burkhardt, Elke; Kindermann, Lars; Zitterbart, Daniel.	5. Abschlussdatum des Vorhabens 30.09.2013	
	6. Veröffentlichungsdatum 12.8.2013	
	7. Form der Publikation Fachzeitschrift	
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung Am Handelshafen 12 27570 Bremerhaven	9. Ber. Nr. Durchführende Institution -	
	10. Förderkennzeichen 03F0479I	
	11. Seitenzahl 19	
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) Alexanderstraße 3 10178 Berlin	13. Literaturangaben 22	
	14. Tabellen 1	
	15. Abbildungen 8	
16. Zusätzliche Angaben Ko-finanziert durch Umweltbundesamt Berlin, FKZ 3708 91 101 -1		
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) -		
18. Kurzfassung Im Rahmen dieses Forschungsprojektes wurde ein automatisches, thermographisches Detektionssystem entwickelt, welches primär als Assistenzsystem zur Unterstützung der Präsenzermittlung von Walen im Rahmen von Mitigationsmaßnahmen bei seismischen Surveys dienen soll. Das System wurde lizenziert und ist nun kommerziell verfügbar. Die zur Ermittlung seiner Effizienz durchgeführten Vergleiche mit visuellen Sichtungsbemühungen zeigen, dass das IR System im kalten Gewässern im Schnitt 1,5-mal mehr Schiff-Wal Begegnungen erfasste als rotierende, 3-köpfige Teams dedizierter Walbeobachter. Darüber hinaus ist es in der Lage, Beobachtungen in dieser Qualität kontinuierlich, sowohl tags als auch nachts, und für mehrere Monate am Stück durchzuführen und so den Schutz der Wale durchgehend sicherzustellen.		
19. Schlagwörter Umweltschutz, Thermographie, künstliche Intelligenz, Wale, Cetaceen		
20. Verlag PLOS One, 1160 Battery Street, Koshland Building East, Ste. 100, San Francisco, CA 94111 US	21. Preis Open Access	

## Document Control Sheet

1. ISBN oder ISSN DOI: 10.1371/journal.pone.0071217	2. type of document Final report
3. title MAPS-IR: Entwicklung, Validierung und Ersteinsatz eines auf Infrarot-Sensoren basierenden Systems zur automatischen Detektion von Walen im Umfeld von Schiffen und Plattformen Titel der Publikation Automatic Round-the-Clock Detection of Whales for Mitigation from Underwater Noise Impacts	
4. author(s) Boebel, Olaf; Bombosch, Annette; Burkhardt, Elke; Kindermann, Lars; Zitterbart, Daniel.	5. end of project 30.09.2013
	6. publication date 12.8.2013
	7. form of publication scientific paper
8. performing organization Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung Am Handelshafen 12 27570 Bremerhaven	9. originator's report no. -
	10. reference no. 03F0479I
	11. no. of pages 19
12. sponsoring organization Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) Alexanderstraße 3 10178 Berlin	13. no. of references 22
	14. no. of tables 1
	15. no. of figures 8
16. supplementary notes co-financed by Environment Protection Agency Berlin, FKZ 3708 91 101 -1	
17. presented at -	
18. abstract In this project, an automatic, thermographic whale detection system was developed, to support the detection of whales in the context of mitigation measures during seismic surveys. The developed software suite was licensed to the hardware manufactures and is commercially available as AIMMMS (Automatic Infrared Marine Mammal Mitigation System). Comparison with visual sightings efforts showed, that – for the cold water realm - the system detected 1.5 times more ship-whale encounters than concurrently operating 3-person teams of rotating, dedicated whale observers. The system is capable of maintaining this quality of detection day and night, and for multiple months in a row, ascertaining a continuous protection of whales.	
19. keywords environmental protection, themography, artificial intelligence, whale, cetacean	
20. publisher PLOS One, 1160 Battery Street, Koshland Building East, Ste. 100, San Francisco, CA 94111 US	21. price Open Access

## Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis .....	iii
Abbildungsverzeichnis .....	iv
Tabellenverzeichnis .....	vi
1 Aufgabenstellung .....	1
2 Voraussetzungen .....	1
3 Planung und Ablauf des Vorhabens .....	3
3.1 Beschaffung, Adaption und Installation der Hardware (Investition) .....	3
3.2 Entwicklung der automatisierten Mustererkennung .....	3
4 Stand des Wissens .....	4
5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen .....	5
6 Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse .....	5
6.1 Material und Methoden .....	5
6.2 Ergebnisse .....	9
6.3 Diskussion .....	12
6.4 Zusammenfassung .....	13
6.5 Ausblick .....	13
7 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises .....	14
8 Notwendigkeit und Angemessenheit .....	14
9 Darstellung voraussichtlichen Nutzens .....	14
10 Bekannt gewordener Fortschritt bei anderen Stellen .....	15
11 Erfolgte /geplante Veröffentlichungen .....	15
11.1 Veröffentlichungen .....	15
11.2 Patente: .....	15
11.3 Fahrtberichte: .....	16
11.4 Präsentationen .....	16
12 Quellenverzeichnis .....	18

## Abbildungsverzeichnis

- Abbildung 6-1 Aufbau des IR Waldetektionssystems an Bord von *Polarstern*. Oben links: Sensorkopf (NATO-grün) und Stabilisierungseinheit (Gimbal, weiß) auf dem Krähennest des Schiffes. Oben rechts: IR Arbeitsplatz an Bord. Unten: Benutzeroberfläche von *Tashtego*, die sich im Betrieb über drei 24-Zoll Monitore erstreckt (s. Bild darüber)..... 6
- Abbildung 6-2 Zusammenfassende Darstellung des Detektionsalgorithmus. Stufe 1: Das gesamte Bild (5 pro Sekunde) wird in 31600 Bereiche (Snippets) unterteilt. Stufe 2: Der Detektor durchsucht die Snippets nach solchen mit hoher Kontraständerung und gibt ca. 5000 dieser kontrastreichen Snippets pro Sekunde an den Klassifikator weiter. Stufe 3: Der Klassifikator klassifiziert diese gemäß vorab antrainierten Mustern und reduziert die Zahl möglicher Ereignisse weiter (im Schnitt ca. 6 pro Stunde). Stufe 4: Alarmierung des Walbeobachters, der das Ereignis am Bildschirm sofort validieren kann. .... 7
- Abbildung 6-3 A-D: Thermographische Videoausschnitte (0.2 sec Auflösung) von Walblasen bei Nacht:  
 A) 24.03.2012 00:07; 61.11°S 56.36°W;  $T_{\text{wasser}} = 1.3^{\circ}\text{C}$ ;  $T_{\text{luft}} = -1.7^{\circ}\text{C}$ ;  $r = 3608 \text{ m}$ ; B) 28.03.2012 03:27; 61.88°S 60.29°W;  $T_{\text{wasser}} = 1.4^{\circ}\text{C}$ ;  $T_{\text{luft}} = 2.3^{\circ}\text{C}$ ;  $r = 3608 \text{ m}$ ;  
 C) 29.12.2011 01:06; 56.49°S 00.00°E;  $T_{\text{wasser}} = -0.8^{\circ}\text{C}$ ;  $T_{\text{luft}} = -0.5^{\circ}\text{C}$ ;  $r = 1116 \text{ m}$ ; D) 01.01.2012 02:38; 43.96°S 07.44°E;  $T_{\text{wasser}} = 8.8^{\circ}\text{C}$ ;  $T_{\text{luft}} = 8.7^{\circ}\text{C}$ ;  $r = 879 \text{ m}$ ; E: Thermographischer (oben) und visueller (unten) Videoausschnitt eines automatisch detektierten Walblases: 28.12.2011 14:41; 58.65°S 0.02°E;  $T_{\text{wasser}} = -1.5^{\circ}\text{C}$ ;  $T_{\text{luft}} = -0.6^{\circ}\text{C}$ ;  $r = 1072 \text{ m}$ . .... 8
- Abbildung 6-4 Schematische Darstellung des STC/LTC Algorithmus. Das Beispiel zeigt den V-förmigen Blas eines Buckelwals. Die schwarze Kurve stellt den Kurzzeitkontrast (STC), die rote den Langzeitkontrast (LTC) dar. Blauer und rosa Hintergrund symbolisieren die Zeiträume über die der jeweilige Kontrast berechnet wurde. Die blaue Kurve deutet einen adaptiven Grenzwert (AT) an, der gemäß Gleichung 1 berechnet wird..... 9
- Abbildung 6-5 A) ROC Kurve auf Cue-Ebene des Klassifikators für Test-, Trainings- und Validierungsdatensatz. AUC Werte: Training: 0.99; Test: 0.98; Validierung Tageslicht: 0.90; Validierung Nacht: 0.98. B) Linien mit Fehlerbalken (Standard Fehler): Anteil automatischer Detektionen an visuellen Sichtungen (schwarz) und Anteil visueller Sichtungen an automatischen, händisch validierten Detektionen (grau) in Abhängigkeit von Entfernungskategorien. Balkendiagramm: Anzahl automatischer Detektionen (schwarz) und visueller Sichtungen (grau) in Abhängigkeit von Entfernungskategorien. .... 10
- Abbildung 6-6 Buckelwalgruppe während einer Schiff-Wal-Begegnung. Links: Lage detektierter Walblase (Dreiecke) relativ zum Schiff. Rechts: Georeferenzierte Darstellung der Schiff-Wal-Begegnung. Unten:

Zeitverlauf. Der Ort des Schiffes zum Detektionszeitpunkt ist mit kleinen Punkten, die entsprechende Walblaspositionen mit Dreiecken gleicher Farbe abgebildet. Die Farbe repräsentiert die seit der ersten Detektion vergangene Zeit. .... 10

Abbildung 6-7 Relative (oben links) und absolute (unten links) Trajektorie eines Zwergwals während einer Schiff-Walbegegnung am 13. Feb 2010, 01:32:11. Oben rechts: Grafik des Blas Intervalls und der zwischen einzelnen Blasen geschwommenen Entfernungen. Unten rechts: Schnappschuss eines Bildausschnittes des thermographischen Videos, einer der vermessenen Walblase ist etwa im oberen rechten Bildquadranten zu erkennen..... 11

Abbildung 6-8 Rot: Absolute (A) und relative (B) Präzision der Entfernungsbestimmung des IR Systems. Aufgrund der verwendeten nichtlinearen sphärischen Triangulation ist der absolute Fehler entfernungsabhängig. Für Entfernungen kleiner 5 km sind die relativen Fehler geringer als 12%. Blau: Ebenso für 7x50 Fernglas mit auf  $\frac{1}{4}$  Strichelung interpolierter Winkelbestimmung. .... 12

## **Tabellenverzeichnis**

Tabelle 3-1 Erhebungen thermographischer Videodaten im Projektzeitraum. ....	3
--	---

# 1 Aufgabenstellung

Anthropogene ozeanische Aktivitäten sind fast ausnahmslos mit der Emission von Unterwasserschall verbunden. Hydroakustische Messverfahren wie die Erdöl-Explorationsseismik, die Forschungsseismik, militärische Sonarsysteme zur U-Boot Detektion aber auch wasserbauliche Tätigkeiten wie Rammarbeiten für offshore Windparks generieren dabei Quellschalldrücke von höchster Intensität. Bislang beobachtete Auswirkungen dieser Schalleinträge auf die marine Fauna - insbesondere auf Meeressäuger - reichen von „nicht feststellbar“ über Vermeidungsverhalten der Tiere bis hin zum Tode kleinerer Gruppen von Walen. Aus diesem Grund bestehen international und national (z.B. ASCOBAMS, ACCOBAMS, OSPAR, EU, UNO) breit gefächerte Bestrebungen, den Einsatz von hydroakustischen Methoden zu reglementieren und ihre Genehmigung mit einem obligatorischen Einsatz von Mitigationsmaßnahmen (meist dem Abschalten der Geräte bei Präsenz von marinen Säugern im Umfeld der Schallquelle) zu verbinden.

Voraussetzung für die Umsetzung solcher Auflagen ist eine kontinuierliche und zuverlässige Beobachtung des Schiffs- bzw. Tätigkeitsumfelds über lange Zeiträume, ggf. auch nachts. Eine schiffsbasierte, visuelle Überwachung der Schiffsumgebung hinsichtlich der Präsenz von marinen Säugern erfordert jedoch höchste Konzentration und somit große Beobacherteams wenn sie ununterbrochen über mehrere Monate hinweg erfolgen soll. Dabei bleiben die Beobachtungen auf Zeiten mit Tageslicht beschränkt. Um diesen Einschränkungen zu begegnen, sollte, mitfinanziert durch dieses Projekt, ein thermographisches Waldetektionssystem entwickelt und Videodaten zur Entwicklung und zur Bestimmung seiner Effizienz erhoben werden. Da die kontinuierliche Betrachtung solcher Videodaten jedoch ähnlich anstrengend wie eine direkte Beobachtung der Wasseroberfläche ist, sollte hierfür ein automatischer Detektionsalgorithmus für Walblase entwickelt werden. Der Detektionsalgorithmus sollte mit einem etablierten Detektor/Klassifikator-Ansatz aus dem Gebiet der Künstlichen Intelligenz umgesetzt werden. Das IR System sollte letztendlich in der Lage sein, die Meeresoberfläche Tag und Nacht kontinuierlich und zuverlässig nach thermischen Signaturen von Walblasen abzuscannen, diese aufzuzeichnen und in Echtzeit anzuzeigen.

# 2 Voraussetzungen

Die IR Technologie wurde in der Vergangenheit fast ausschließlich im militärischen Bereich eingesetzt. Zivile Anwendungen waren durch Kosten- und Exportbeschränkungen stark beschränkt. Dies hatte sich zu Beginn dieses Jahrtausends jedoch gewandelt, worauf das AWI mit ersten schiffsgebundenen IR-Experimenten reagierte, bei denen versucht wurde, die Präsenz von Meeressäugern mittels kommerziell erhältlicher IR-Kameras zu erfassen. Auf einer Polarsternexpedition im Frühjahr 2005 gelangen zahlreiche IR Detektionen von Walen anhand ihres warmen und damit im infraroten sichtbaren Blas. Die Bilder zeigen außerdem einen deutlichen thermischen Kontrast zwischen freiem Wasser und Eis, sowohl bei Tag als auch bei Nacht, sowie auf dem Eis ruhende Robben, deren Wärmesignatur sich deutlich vom umgebenden Eis unterschied.

Ermutigt durch diese positiven Ergebnisse, wurden für die Expedition ANT XXII/3 zwei IR Systeme auf dem Peildeck fest installiert und systematisch thermographische Aufnahmen gemacht. Hierzu wurde die Bilderfassung während der Reise automatisiert, sodass sowohl zeitlich getaktete als auch durch thermische Anomalien getriggerte „Snippets“ (kurze Filmsequenzen) aufgenommen



werden konnten. Dabei entstanden zahlreiche Aufnahmen von blasenden Walen, die zeigten, dass der Walblas unter verschiedensten Umweltbedingungen im IR klar sichtbar ist. Einzig dichter Nebel verhindert die Detektion. Aufgrund der gemachten Erfahrungen wurden für die darauf folgende Expedition ANT XXIII-2 weitere technische Verbesserungen vor allem in Bezug auf die Anordnung des Systems umgesetzt. Unter anderem wurde versucht, durch eine halbkardanische Aufhängung des Systems im Krähenest eine kostengünstige Bildstabilisierung zu erreichen – ein Ansatz der aufgrund der hohen Windlast in dieser Höhe jedoch nicht zufrieden stellend funktionierte. Des Weiteren wurden die wetterfesten Kameragehäuse größer dimensioniert, um den bildverschlechternden Einfluss der Gehäuseheizung zu minimieren. Weiter wurden die beiden IR Kameras mit verschiedenen ( $7^\circ$ ,  $12^\circ$ ) Linsen versehen, um den optimalen Kompromiss zwischen Reichweite, Bildauflösung und Bildrauschen aufgrund der Eigentemperatur der Linse zu bestimmen. Auf der Expedition ANT XXIV-3 gelangen mit den genannten Teleobjektiven erste seegestützte Aufnahmen von blasenden Walen in großer (mehrere km) Entfernung.

Mit Hilfe der oben beschriebenen Systeme konnte somit prinzipiell die Machbarkeit einer automatisierten IR Detektion dargestellt werden. Eine wesentliche Einschränkung bestand jedoch in der Auflösung der IR Aufnahmen. Kommerzielle IR Sensoren hatten seinerzeit eine Auflösung von  $320 \times 240$  Pixel, mit denen ein  $7$ - $12^\circ$  Winkelsegment abgedeckt wurde. Eine Rundumüberwachung hätte somit mindestens 30 Kameras erfordert, was zwar eine technisch mögliche, jedoch wartungsintensive und wenig robuste Lösung dargestellt hätte. Unsere Experimente mit Mustererkennungsalgorithmen zur automatischen Detektion zeigten auch, dass für ein automatisches Überwachungssystem bereits auf Seite der Bilderfassung einige grundlegende Verbesserungen notwendig waren, um z.B. Fehldetektionen (z.B. brechende Wellen) zu vermeiden. Folgende Verbesserungen erscheinen notwendig:

- Eine aktive Stabilisierung des Bildes bzgl. Pitch and Roll relativ zum Gravitationsvektor um den Bildbereich auf der Wasseroberfläche zu halten und um scheinbare Aufwärtsbewegungen von quasi-stationären Temperaturanomalien (sich brechende Wellen, auf dem Wasser ruhende Vögel) zu vermeiden;
- Eine höhere Temporauflösung um die Detektionsreichweite zu maximieren;
- Eine größere Bit-Tiefe der übertragenen Temperaturdaten um die volle Intensität des Signals des Walblas in der Mustererkennung nutzen zu können;
- Die Realisation einer quasi-Rundumüberwachung;
- Weitere Verbesserungen in der vertikalen Auflösung, ebenfalls um die Detektionsreichweite zu maximieren.

Unabhängig von unseren Bemühungen wurde zeitgleich durch Rheinmetall Defence Electronics GmbH (RDE) das Überwachungs- und Alarmierungssystem FIRST (Fast Infrared Search and Track) für militärische Objektschutzanwendungen entwickelt. FIRST basiert auf einem rotierenden Sensorkopf und hat aufgrund eines gekühlten Line-Array Sensors im Vergleich mit kommerziellen thermographischen Bildgebern neben einer kompletten  $360^\circ$  Abdeckung den Vorteil einer höheren Temporauflösung. Hierdurch werden einerseits die Einsatzmöglichkeiten in Bezug auf Wale über die polaren Gebiete hinaus auf die subpolaren und subtropischen Regionen ausgedehnt, andererseits aber auch weit vorausblickende, kollisionsverhindernde Anwendungen ermöglicht. Erste Gespräche zwischen AWI und Rheinmetall zeigten, dass FIRST an die eingangs beschriebenen Problematiken der Waldetektion adaptiert werden könnte. In Kombination mit einer auf das Problem der Waldetektion angepassten, automatisierten Mustererkennung sollte eine optimierte Lösung gefunden werden, die sowohl der Schiffssicherheit als auch dem Umwelt-/Naturschutz dient. Das dabei entstehende Hightech Produkt versprach weltweit einmalig zu sein

und Deutschlands Position als führenden Entwicklungsstandort für Maritime Technologien weiter zu stärken.

### 3 Planung und Ablauf des Vorhabens

#### 3.1 Beschaffung, Adaption und Installation der Hardware (Investition)

In diesem Schritt wurde ein auf die hier vorliegenden Fragestellungen optimierter IR Sensor inklusive Basissoftware zur Bilddarstellung akquiriert und auf FS Polarstern installiert werden. Nach der Werksabnahme des Systems in 2008 erfolgte während der Wertzeit im Mai 2009 die Installation des Infrarotsensors im Krähennest der FS Polarstern auf einem gegen Schiffsbewegungen in höchstem Maße stabilisierten Sensorträger (ebenfalls Bestandteil der Investition). Letzterer wurde auf die besonderen Umweltbedingungen der Antarktis und Arktis optimiert. Vorbereitende Installationsmaßnahmen (Verlegung der Datenkabel, Spannungsversorgung, Fundament für Plattform) wurden während der Wertzeit Oktober 2008 durchgeführt werden und sind Bestandteil der AWI Eigenleistungen. Die zur Datenerfassung und Bilddarstellung notwendige Computer Hardware wurde gemäß der Spezifikationen des IR-Sensor Herstellers doppelt beschafft, um eine Entwicklung der Detektionssoftware und die Datenanalyse in Bremerhaven zu ermöglichen. Um das System länger, flexibler und zuverlässiger nutzen zu können wurde in 2011 das Projektvolumen aufgestockt und ein zweiter Sensorkopf beschafft.

#### 3.2 Entwicklung der automatisierten Mustererkennung

Die während der Projektlaufzeit gewonnenen Erkenntnisse flossen iterativ in die Weiterentwicklung der Hard- und Softwarekomponenten des Gesamtsystems ein. Insbesondere war es aufgrund der hohen Datenmenge notwendig, die zu entwickelnde Software der Mustererkennung eng mit der (proprietären) Basissoftware zu verknüpfen sowie systemspezifische Charakteristika bei der Entwicklung der Mustererkennung zu berücksichtigen. Um hierbei systemspezifisches Herstellerwissen und Optimierungsvorschläge nutzen und technisch umsetzen zu können, wurde der entsprechenden Support und Modifikationen an proprietärer Hard- und Basissoftware direkt beim Hersteller abgerufen. Darüber hinaus wurden über die gesamte Projektlaufzeit hinweg regelmäßig (typischerweise halbjährlich) Projektbesprechungen zwischen AWI und RDE durchgeführt.

Tabelle 3-1 Erhebungen thermographischer Videodaten im Projektzeitraum.

Expedition	Expeditionsjahr	Sensorkopf SN	Betriebsdauer [h]	Betriebsdauer [Tage]
ARK 24.1	2009	1	400 h	16 d
ANT 26.3	2010	1	436 h	18 d
ANT 27.1	2010	1 → 2	690 h	29 d
ANT 27.2	2010/11	2 → 3	1410 h	59 d
ANT 28.2	2011/12	1	751 h	31 d
ANT 28.4	2012	1	585 h	24 d
ARK 27.3	2012	1	1563 h	66 d
ANT 29.2	2012/13	1 → 2 → 1	726 h	30 d
<b>Total 8</b>			<b>6552 h</b>	<b>274 d</b>

Während der Laufzeit dieses Projektes wurde die IR Kamera auf insgesamt 8 Expeditionen betrieben, und Videodaten zu Entwicklungszwecken und zur Bestimmung der Effizienz des automatischen Waldetektionssystem erhoben. Das Training des aktuellen Klassifikators (siehe unten) erfolgte anhand von Daten der Expedition ANT 27.2 (11-23 Dezember 2010, und 8, 19, 20, 21, 23-25, und 27 Januar 2011). Vergleiche erfolgten mit Sichtungen durch dedizierte Wal- und Warmblüter-Beobachter, u.A. auch im Rahmen der Distanz Sampling Beobachtungen durch das parallele ITAW Projekt (siehe auch AWI und ITAW Abschlussberichte zum UBA Projekt (bislang unveröffentlicht), während der Expeditionen ANT 27.2 und ANT 28.2.

## 4 Stand des Wissens

Eine schiffsbasierte, visuelle Überwachung der Schiffsumgebung hinsichtlich der Präsenz von marinen Säugern erfordert höchste Konzentration und somit große Beobacherteams wenn sie ununterbrochen über mehrere Monate hinweg erfolgen soll. Dabei bleiben die Beobachtungen auf Zeiten mit Tageslicht beschränkt. Um Einschränkungen durch fehlendes Tageslicht, die Ermüdung der Beobachter, oder die jeweils realisierbare Beobachterzahl überwinden zu können, wurde bereits 1987 die Nutzung thermographischer Systeme zur Detektion von Walen diskutiert. In einer Studie für Shell Western E&P ermittelten Greene und Chase [1987] hierfür die Sichtbarkeit von Walblasen in Infrarotaufnahmen. Hierbei konnten die Blase des Großen Tümmlers und des Kleinen Schwertwals in einem Aquarium in einer Entfernung von 15-20m mit hohem Kontrast beobachtet werden. In freiem Wasser konnten Grauwale in einer Entfernung von 100m erkannt werden. Greene und Chase nutzten hierfür einen Infrarotscanner der im 8-12 $\mu$ m Band arbeitete und ein 18°x14° Sichtfeld aufwies. Anhand dieser Ergebnisse ermittelten sie Spezifikationen für einen „idealen“ IR Scanner, der in der Arktis eine Arbeitsentfernung von 3km erreichen sollte, zum damaligen Zeitpunkt technisch jedoch noch nicht realisierbar war.

Cuyler et al. [1992] verwendet thermografische Messungen um die Temperatur der Hautoberfläche von Walen zu ermitteln. Hierbei wurde eine mit flüssigem Stickstoff gekühlte Handkamera verwendet. Von einem Boot aus wurden vor den Küsten von Norwegen und Spitzbergen Haut- und Blastemperaturen von Zwerg-, Buckel- und Finnwalen in geringer Entfernung vermessen (10-70m). Der Detektor arbeitete im LWIR Band (8-12 $\mu$ m) und lieferte 175 (horizontal) x 280 (vertikal) Pixel mit einer 7°Linse. Die Beobachtung erfolgte aus 8m Höhe über dem Wasser. Die Studie konnte zeigen, dass die Temperatur der Hautoberfläche nur minimal (0.0° bis 1.0°C) über den Wassertemperaturen lag (2.7° bis 10.1°C). Die Temperaturunterschiede zwischen Extremitäten wie Brustflossen oder Fluke lag 0.0° bis 6.0°C über den Wassertemperaturen. Walblase erschienen im Infrarotbild mit einer effektiven Temperaturdifferenz von 0.2° bis 4.1°C. Die Autoren schlossen hieraus, dass eine direkte Detektion des Walkörpers durch den geringen Temperaturunterschied nicht zuverlässig wäre, für den Walblas jedoch durchweg positive Temperaturanomalien gemessen werden konnten.

Perryman und Kollegen [1999] verwendeten landbasierte Thermografie während einer 3-jährigen Studie um tageszeitliche Variationen im Migrationsverhalten von Grauwalen vor Kalifornien zu untersuchen. Der gekühlte LWIR Sensor arbeitete ebenfalls im 8 bis 12 $\mu$ m Band und erzeugte Bilder mit 525 Linien bei einem Öffnungswinkel von 3.4° x 6.8°. Die Kamera war 22m über der Meeresoberfläche auf einem Felsen mit Sicht auf den Ozean montiert, und konnte den Ozean von 360m Entfernung vor der Küste bis zum Horizont abbilden. Die Studie besagt, dass Walblase sowohl am Tage als auch in der Nacht in Entfernungen bis zu 4km (bei idealen Bedingungen bis 5.4km) deutlich sichtbar waren. Die Auswertung erfolgte durch manuelle Sichtung des Videomaterials.

Baldacci et al. [2005] testeten ein Infrarotfernglas zur Waldetektion im Mittelmeer. Das SAGEM MATIS Fernglas arbeitete (im Unterschied zu den allen o.g. Studien) im 3-5 $\mu$ m Band und hatte ein maximales Sichtfeld von 9° x 6° die auf einen gekühlten Sensor mit 382x256 Pixel projiziert wurden. Die Autoren berichten über die Detektierbarkeit von Walblasen und -körpern verschiedener Arten in typischerweise 1-2 nautischen Meilen Entfernung, sowohl am Tage als auch in der Nacht. Da die Studie im Mittelmeer durchgeführt wurde, sind diese Ergebnisse für die Umsetzbarkeit von thermographischer Waldetektion auch in warmen Gewässern sehr vielversprechend.

2011 berichteten Graber et al. [2011] über die landbasierte Detektion von Schwertwalen vor der Küste mittels einer ungekühlten FLIR Infrarot Kamera. Die Detektionsreichweiten variierten hierbei von 42 bis 162m. Eine aktuelle Studie zu IR basierter Waldetektion von Santhaseelan et al. [2012] beschreibt einen automatischen Detektionsalgorithmus auf Basis eines neuronalen Netzes. Die Studie basiert vermutlich auf den von Perryman et al. gewonnenen Daten [1999], beschreibt jedoch weder Detektionsreichweiten noch Echtzeitfähigkeit.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass eingeschränkte Gesichtsfelder (<18°) und die fehlende Stabilisierung der Kameras (handgehalten oder auf einem landbasierten Stativ) einen dauerhaften Einsatz zur Überwachung auf See unmöglich machten. Darüber hinaus basiert die Datenverarbeitung bei fast allen bisherigen Studien (mit Ausnahme von Santhaseelan et al. [2012]) auf einer manuellen Auswertung von Videoaufnahmen. Im Kontext der Mitigation muss die Detektion in nahezu Echtzeit (wenige Sekunden) stattfinden um einen optimalen Schutz des Individuums zu garantieren. Weiterhin muss für eine effektive Mitigation die gesamte Schiffsumgebung zumindest innerhalb des Mitigationradius rund um die Uhr und über Wochen hinweg überwacht werden. Solch ein Einsatz erfordert eine automatische, maschinelle Detektion.

## 5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Das Vorhaben wurde gemeinsam durch BMBF, BMU (FKZ 3708 91 101 -1) und AWI Mittel finanziert. Die BMBF Mittel wurden dabei primär zur Finanzierung der Investitionskosten (Sensorsystem) eingesetzt, während BMU Mittel primär bei den Personalkosten zum Einsatz kamen. AWI Mittel deckten weitere Personal-, Expeditions- und Verbrauchskosten sowie anteilig die Beschaffung des Ersatzsensorkopfes ab.

## 6 Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse

### 6.1 Material und Methoden

Das in diesem Projekt entwickelte automatische Waldetektionssystem basiert auf einem modifizierten militärischen Infrarotscanner (IR Scanner, Abbildung 6-1), der auf einer aktiv stabilisierten, kardanischen Aufhängung (Gimbal) montiert ist. Die Datenerfassung und Auswertung wird von der am AWI entwickelten Software *Tashtego* übernommen. Der gekühlte thermographische Sensor überstreicht 5-mal pro Sekunde ein Sichtfeld von 360° x 18°. Die Winkelauflösung beträgt hierbei 0.05°/Pixel (horizontal) und 0.03°/Pixel (vertikal). Das System ist in 28.5 m Höhe über der Wasseroberfläche auf *Polarstern* installiert. Die Entfernung zwischen Schiff und Wal wird mittels sphärischer Triangulation [*Lerczak and Hobbs*, 1998] berechnet.

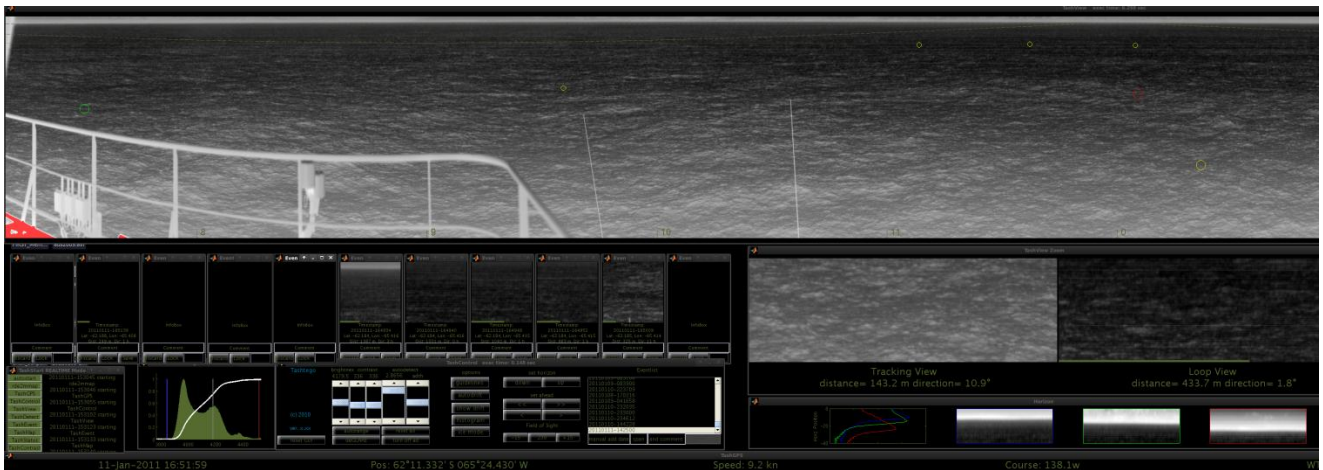
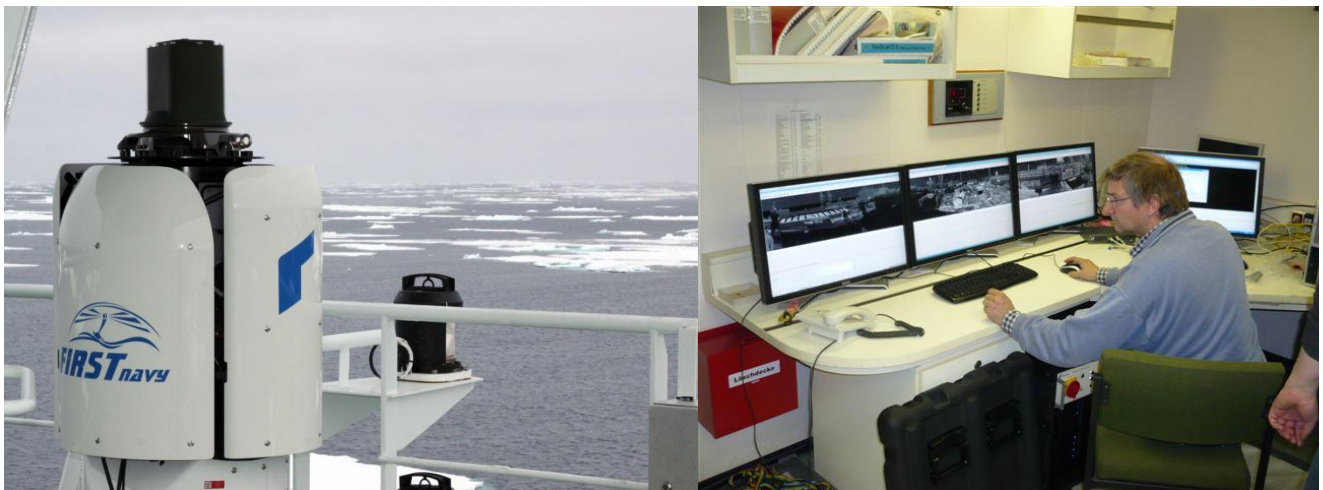


Abbildung 6-1 Aufbau des IR Waldetektionssystems an Bord von *Polarstern*. Oben links: Sensorkopf (NATO-grün) und Stabilisierungseinheit (Gimbal, weiß) auf dem Krähenneest des Schiffes. Oben rechts: IR Arbeitsplatz an Bord. Unten: Benutzeroberfläche von *Tashtego*, die sich im Betrieb über drei 24-Zoll Monitore erstreckt (s. Bild darüber).

Die thermographischen Bilder werden über eine direkte 1Gbit Netzwerkverbindung an den Datenverarbeitungsrechner übertragen. Die Bilder werden in einem 5-Bild (1 Sekunde) Ringpuffer in einem geteilten Speicherbereich zwischengespeichert und von der Analysesoftware eingelesen. Vor der Übergabe an den eigentlichen Detektionsalgorithmus wird das Bild vorverarbeitet und um die unterschiedlichen Sensorelementcharakteristiken dynamisch Weißbild-korrigiert. Aufgrund der massiven Datenströme werden Bilddaten in der Regel nur für automatische Detektionen (siehe unten) oder auf manuelle Vorgabe hin permanent gespeichert.

Der Detektionsalgorithmus<sup>1</sup> wurde mit einem etablierten Detektor/Klassifikator Ansatz aus dem Gebiet der Künstlichen Intelligenz umgesetzt (Abbildung 6-2). Hierbei werden in einer über das Bild geschobenen, virtuellen Kachel von positionsabhängiger Größe (in Abbildung 6-2 durch grüne

<sup>1</sup> Die Wortgruppe „Detektion“ ist mit mehrfacher Bedeutung belegt, die wir zur besseren Verständlichkeit hier kurz definieren. Unter Waldetektionssystem wird das Gesamtsystem verstanden:

Waldetektionssystem = IR-Scanner + Datenmanagement + Grafisches Nutzerinterface + Detektionsalgorithmus.

Der Detektionsalgorithmus wiederum besteht aus zwei Komponenten:

Detektionsalgorithmus = Detektor + Klassifikator.

Der **Detektor** entspricht somit der ersten Stufe des **Detektionsalgorithmus**, der wiederum eine Komponente des **Waldetektionssystems** darstellt. Die Begriffe **Detektion** bzw. „detektiert“ verwenden wir im Folgenden dann im Sinne von Anschlägen des Detektionsalgorithmus (nicht des Detektors).



Fenster symbolisiert) die Veränderungen der lokalen Kontraste betrachtet [Dalal and Triggs, 2005; Felzenszwalb et al., 2008; Jones and Viola, 2001; Rowley et al., 1995].

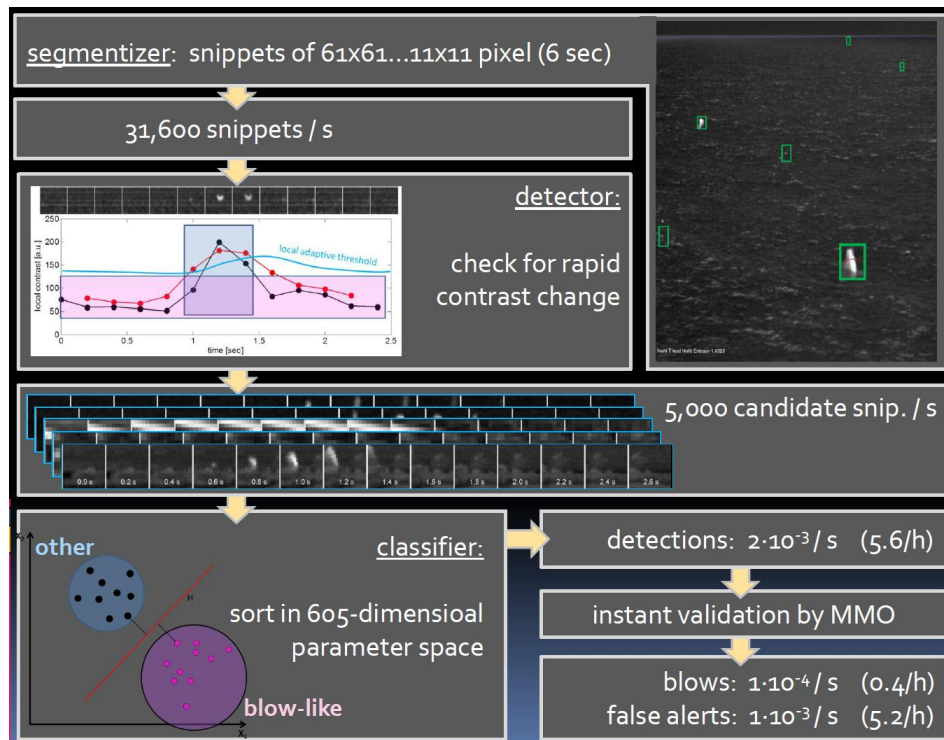


Abbildung 6-2 Zusammenfassende Darstellung des Detektionsalgorithmus. Stufe 1: Das gesamte Bild (5 pro Sekunde) wird in 31600 Bereiche (Snippets) unterteilt. Stufe 2: Der Detektor durchsucht die Snippets nach solchen mit hoher Kontraständerung und gibt ca. 5000 dieser kontrastreichen Snippets pro Sekunde an den Klassifikator weiter. Stufe 3: Der Klassifikator klassifiziert diese gemäß vorab antrainierten Mustern und reduziert die Zahl möglicher Ereignisse weiter (im Schnitt ca. 6 pro Stunde). Stufe 4: Alarmierung des Walbeobachters, der das Ereignis am Bildschirm sofort validieren kann.

Der Detektor identifiziert hierbei walblasähnliche, thermische Anomalien anhand ihres Verhältnisses aus Kurzzeit zu Langzeitkontrast (STA/LTA) [Coppens, 1985] in jeder der 5694 räumlich überlappenden Kacheln. Die nachgeschaltete Klassifikation erfolgt nach Dimensionsreduktion durch eine Hauptachsentransformation und Rückprojektion auf ein vorher errechnetes Eigenimage Koordinatensystem [Dollar, 2006; Sirovich and Kirby, 1987] mittels einer vortrainierten Support Vektor Maschine [Chang, 2011]. Das Training dieser Support Vektor Maschine erfolgte mittels überwachtem Lernen auf der Basis von 120 manuell verifizierten Walblasen und 1400 verifizierten nicht-Walblasen. (Siehe auch Zitterbart et al., 2013b für weitere Details zum Detektionsalgorithmus.)

Detektor und Klassifikator arbeiten auf einer über das gesamte Bild wandernden Kachel unterschiedlicher Größe [Dalal and Triggs, 2005; Felzenszwalb et al., 2008; Jones and Viola, 2001; Rowley et al., 1995]. Dadurch wird der Detektionsalgorithmus unempfindlich gegenüber Änderungen des Kontrastes im Gesamtbild. Die Kachelgröße hängt von der vertikalen Position im Bild ab und variiert von 11x11 bis 63x63 Pixel (11, 23, 43, 63), da die vertikale Position im Bild unterschiedlichen Entfernungen und somit abgebildeten Blasgrößen entspricht (Abbildung 6-3). Die Kacheln überlappen um 50% um ein Splitten einer Blassignatur am Kachelrand abzufangen. Kacheln mit Helligkeitsanomalien die aufgrund ihrer zeitlichen Kontraständerung einer Walblassignatur ähneln werden vom Detektor selektiert. Hierzu wird zuerst die Intensität innerhalb einer Kachel über einen Zeitraum  $t$  normiert und anschließend ein STC/LTC (Short-Term-Contrast

over Long-Term-Contrast) [Coppens, 1985] Algorithmus als Maß für die Kontraständerung angewendet (Abbildung 6-4).

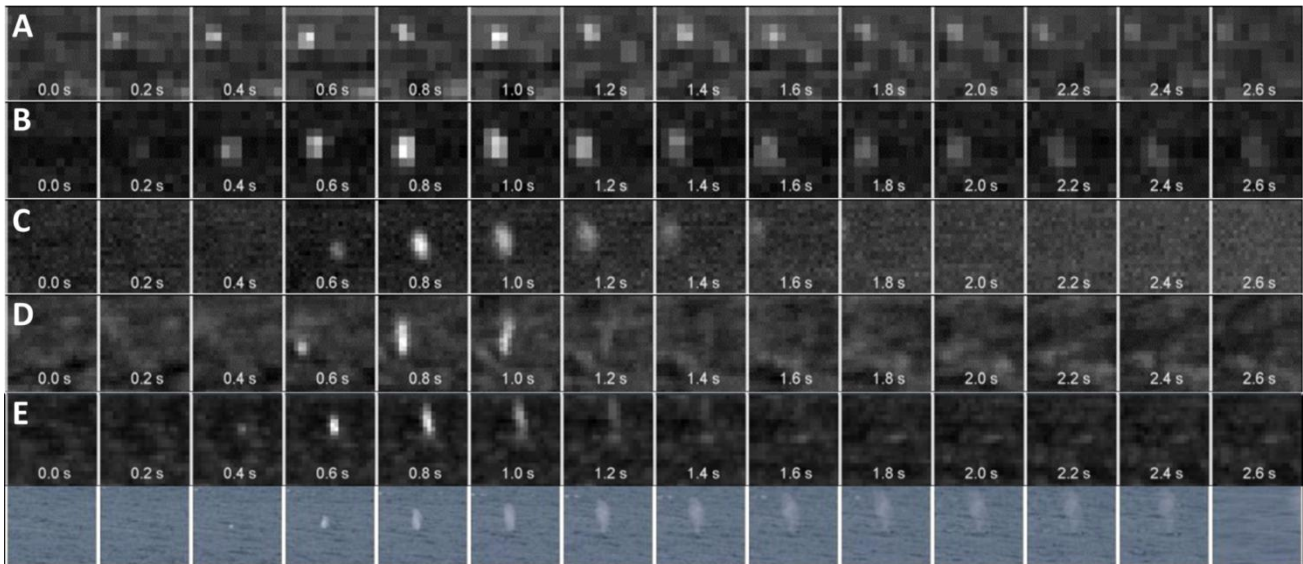


Abbildung 6-3 A-D: Thermographische Videoausschnitte (0.2 sec Auflösung) von Walblasen bei Nacht:

A) 24.03.2012 00:07; 61.11°S 56.36°W;  $T_{\text{Wasser}} = 1.3^{\circ}\text{C}$ ;  $T_{\text{Luft}} = -1.7^{\circ}\text{C}$ ;  $r = 3608 \text{ m}$ ;

B) 28.03.2012 03:27; 61.88°S 60.29°W;  $T_{\text{Wasser}} = 1.4^{\circ}\text{C}$ ;  $T_{\text{Luft}} = 2.3^{\circ}\text{C}$ ;  $r = 3608 \text{ m}$ ;

C) 29.12.2011 01:06; 56.49°S 00.00°E;  $T_{\text{Wasser}} = -0.8^{\circ}\text{C}$ ;  $T_{\text{Luft}} = -0.5^{\circ}\text{C}$ ;  $r = 1116 \text{ m}$ ;

D) 01.01.2012 02:38; 43.96°S 07.44°E;  $T_{\text{Wasser}} = 8.8^{\circ}\text{C}$ ;  $T_{\text{Luft}} = 8.7^{\circ}\text{C}$ ;  $r = 879 \text{ m}$ ;

E: Thermographischer (oben) und visueller (unten) Videoausschnitt eines automatisch detektierten Walblases: 28.12.2011 14:41; 58.65°S 0.02°E;  $T_{\text{Wasser}} = -1.5^{\circ}\text{C}$ ;  $T_{\text{Luft}} = -0.6^{\circ}\text{C}$ ;  $r = 1072 \text{ m}$ .

Der STC/LTC Wert einer jeden Kachel muss folgender Bedingung entsprechen um als Kandidatenkachel ausgewählt zu werden:

$$\frac{\langle \max(I(t)) - \min(I(t)) \rangle_{dt=-1}^1}{\langle \max(I(t)) - \min(I(t)) \rangle_{dt=-5}^5} > n \cdot \langle \max(I(t)) - \min(I(t)) \rangle_{dt=-30}^0 + 1.5 \cdot \sigma \left( \langle \max(I(t)) - \min(I(t)) \rangle_{dt=-30}^0 \right) \quad (1)$$

Die rechte Seite der Gleichung definiert einen adaptiven Grenzwert (AT). Die Werte  $\max(I(t))$  und  $\min(I(t))$  entsprechen der Maximal- bzw. Minimalintensität innerhalb der Kachel. Die Klammer  $\langle \dots \rangle$  entspricht der Mittelung über die jeweils angegebene Zeitdauer  $dt$ . Sigma ( $\sigma$ ) ist die Standardabweichung. Mit Hilfe des so definierten adaptiven Grenzwerts werden Flächen mit ständig hohen Kontraständerungen (z.B. Reflexionen der Sonne) nicht als Kandidatenkacheln betrachtet, wohingegen kleine Kontraständerungen (z.B. in hoher Entfernung) weiterhin erkannt werden. Um Echtzeitfähigkeit zu garantieren wird der Faktor  $n$  dynamisch so angepasst, dass die Anzahl der pro Bild an den Klassifikator übergebenen Kandidatenkacheln konstant gehalten wird.

Jede Kandidatenkachel wird darauf getestet, ob ihre thermische Signatur einem Walblas entspricht oder nicht (klassifiziert). Hierfür werden alle Snippets auf 11x11 Pixel und 1 sec (5 Bilder) reduziert, und räumlich sowie zeitlich auf das Intensitätsmaximum zentriert. Die Klassifizierung kombiniert einen Eigenbildansatz [Sirovich, 1987 #3006; [Dollar, 2006] zur Dimensionsreduktion mit darauffolgender Anwendung eines Stützvektormodells (SVM) zur Klassifikation [Chang, 2011]. Zum Training der SVM wurden im Vorfeld 120 Blas und 1400 nicht-Blas Bildausschnitte ausgesucht (durch Anwendung des Detektors ohne den Klassifikator) und manuell validiert.

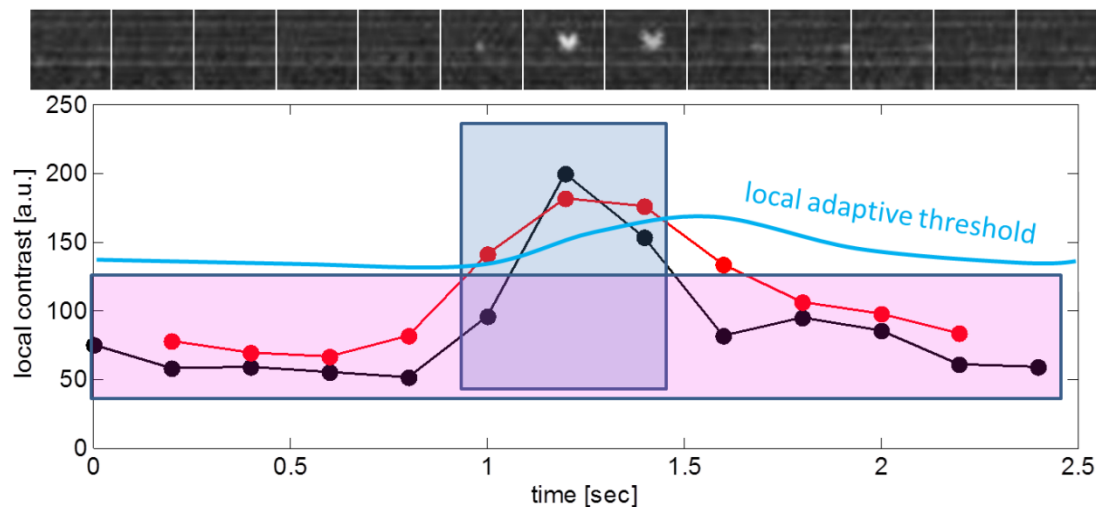


Abbildung 6-4 Schematische Darstellung des STC/LTC Algorithmus. Das Beispiel zeigt den V-förmigen Blas eines Buckelwals. Die schwarze Kurve stellt den Kurzzeitkontrast (STC), die rote den Langzeitkontrast (LTC) dar. Blauer und rosa Hintergrund symbolisieren die Zeiträume über die der jeweilige Kontrast berechnet wurde. Die blaue Kurve deutet einen adaptiven Grenzwert (AT) an, der gemäß Gleichung 1 berechnet wird.

Zum Training wurde der gesamte Datensatz zufällig in einen Test- und einen Trainingsatz geteilt (Blas, sowie „nicht-Blas“). Im nächsten Schritt wurden die Eigenvektoren für den Blas-Trainingsdatensatz errechnet. Die Trainingsbilddaten wurden dann anhand dieser Eigenvektoren rekonstruiert und als Beobachtungen für die SVM verwendet. Die Parameter der SVM wurden Anhand eines Gittersuch-Algorithmus und 5-facher Kreuzvalidierung ermittelt. Die Leistungsfähigkeit des SVM-Modells (Richtig-Positive/Falsch-Positive) wurde anhand des Testdatensatzes gemessen. (Siehe auch [Zitterbart et al., 2013a; Zitterbart et al., 2013b] für weitere Details zum Detektionsalgorithmus.)

## 6.2 Ergebnisse

Mit dem im dem Rahmen dieses Projekts entwickelten Detektionsalgorithmus wurden bislang mehr als 4500 Walblase in bis zu 5500 m entdeckt. Die Walblase wurden während mehr als 300 Schiff-Wal-Begegnungen, mit und ohne Tageslicht und unter verschiedensten Umweltbedingungen aufgenommen (Wassertemperaturen von  $-2^{\circ}$  bis  $18^{\circ}\text{C}$ , Windgeschwindigkeiten von 0 bis 6 Bft).

Eine quantitative Abschätzung der Leistungsfähigkeit des Klassifikators ist durch die ROC (Receiver-Operator-Characteristic) für falsch-positive und richtig-positive Ereignisse gegeben (Abbildung 6-5A, grüne und rote Kurven). Die resultierenden AUC-Werte (Area Under the Curve) sind ein Maß für die Verlässlichkeit eines Klassifikators. Sie ist 0.99 für den Trainingsdatensatz und 0.98 für den Testdatensatz.

Diese sehr hohen Werte müssen jedoch mit Vorsicht betrachtet werden da, obwohl Test- und Trainingsdatensätze nicht die gleichen Blase enthalten, sie dennoch von den gleichen Schiff-Wal-Begegnungen stammen, und somit während gleicher Umweltbedingungen aufgenommen wurden. Daher wurde ein weiterer, völlig unabhängiger Validierungsdatensatz mit dem gleichen SVM Modell vermessen. Hierbei wurden die Walblase nach Tag und Nacht separiert. Die Klassifikationsleistung war bei Blasen in Dunkelheit (AUC=0.98) besser als bei Walblasen, die bei Tageslicht aufgenommen wurden (AUC=0.90) (Abbildung 6-5, schwarze und blaue Kurven). Dies liegt wahrscheinlich an den tagsüber vorhandenen Lichtreflexionen auf der Wasseroberfläche, und der daraus resultierenden höheren Anzahl an Fehlalarmen.



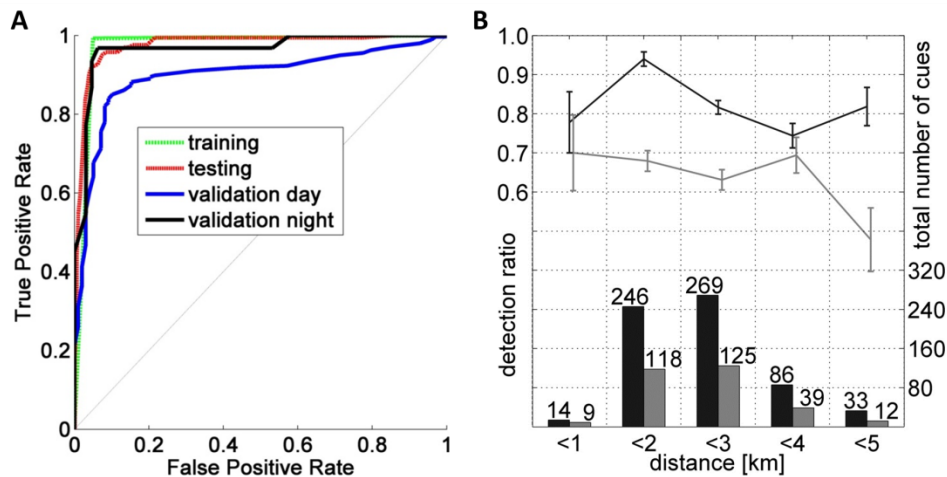


Abbildung 6-5 A) ROC Kurve auf Cue-Ebene des Klassifikators für Test-, Trainings- und Validierungsdatensatz. AUC Werte: Training: 0.99; Test: 0.98; Validierung Tageslicht: 0.90; Validierung Nacht: 0.98. B) Linien mit Fehlerbalken (Standard Fehler): Anteil automatischer Detektionen an visuellen Sichtungen (schwarz) und Anteil visueller Sichtungen an automatischen, händisch validierten Detektionen (grau) in Abhängigkeit von Entfernungskategorien. Balkendiagramm: Anzahl automatischer Detektionen (schwarz) und visueller Sichtungen (grau) in Abhängigkeit von Entfernungskategorien.

Beispielhaft für das operationelle Endprodukt des Systems ist in Abbildung 6-6 die Begegnung einer Gruppe von Buckelwalen mit dem Schiff gezeigt, links relativ zum Schiff, rechts georeferenziert.

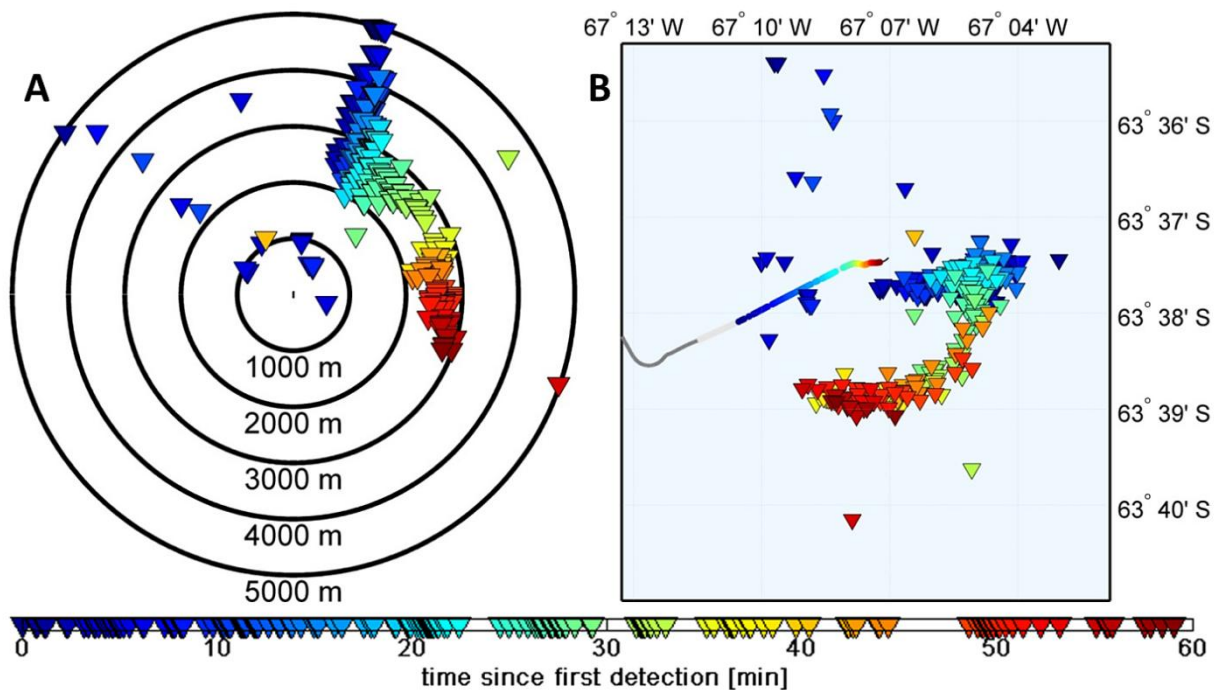


Abbildung 6-6 Buckelwalgruppe während einer Schiff-Wal-Begegnung. Links: Lage detektierter Walblase (Dreiecke) relativ zum Schiff. Rechts: Georeferenzierte Darstellung der Schiff-Wal-Begegnung. Unten: Zeitverlauf. Der Ort des Schiffes zum Detektionszeitpunkt ist mit kleinen Punkten, die entsprechende Walblaspositionen mit Dreiecken gleicher Farbe abgebildet. Die Farbe repräsentiert die seit der ersten Detektion vergangene Zeit.

Hinsichtlich möglicher Verhaltensreaktionen der Wale auf Schiffslärm zeigen die mit Hilfe des IR Systems photometrisch ermittelten Waltrajektorien wenig Auffälligkeiten hinsichtlich möglicher kinematischer Verhaltensreaktionen wie z.B. Änderungen der Schwimmrichtung oder veränderten Blas Intervallen. Die visuelle Durchsicht aller 25 mittels IR vermessenen und georeferenzierten Perioden deutete lediglich bei je einer Schiff-Walbegegnung eine Änderung der Schwimmrichtung bzw. ein Stand-Off Radius an. Im ersten Fall änderte ein Zwergwal seine Schwimmrichtung von ca. 20° zum Schiff auf 110° zum Schiff nachdem er durch das aufholende Schiff außerhalb der vermuteten Abschattungskegels der Propellergeräusche durch den Schiffsrumpf geriet (Abbildung 6-7). Im zweiten (oben illustrierten) Fall scheint eine Gruppe von Buckelwalen zunächst ebenfalls in einem Winkel von 10° zum Schiff vor diesem her zu schwimmen und dann, als es auf Station geht, sich in einen Abstand von ca. 2 bis 3 km vom Schiff (Abbildung 6-6) zu halten und sich achteraus zu bewegen.

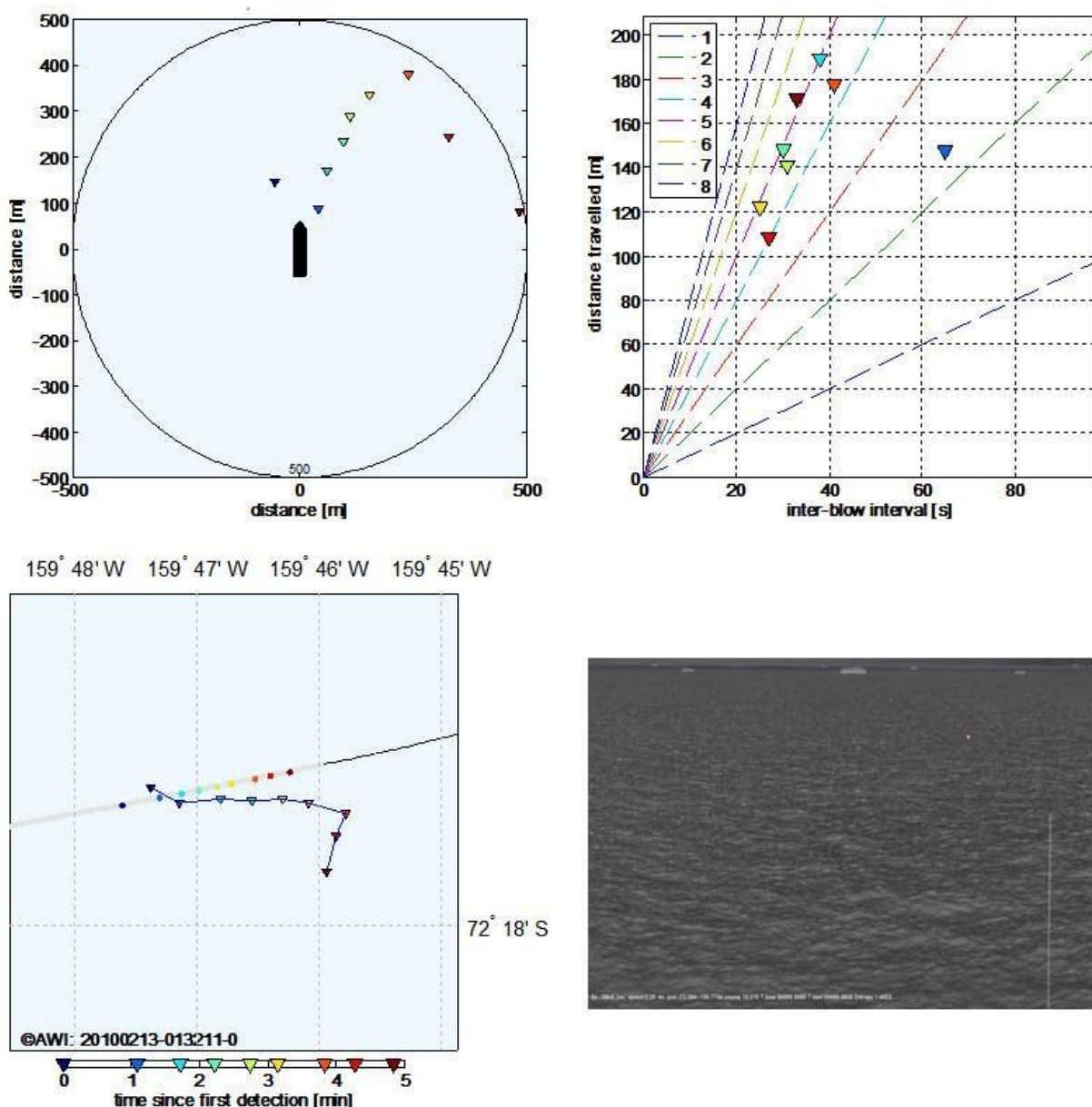


Abbildung 6-7 Relative (oben links) und absolute (unten links) Trajektorie eines Zwergwals während einer Schiff-Walbegegnung am 13. Feb 2010, 01:32:11. Oben rechts: Grafik des Blas Intervalls und der zwischen einzelnen Blasen geschwommenen Entfernungen. Unten rechts: Schnappschuss eines Bildausschnittes des thermographischen Videos, einer der vermessenen

Walblase ist etwa im oberen rechten Bildquadranten zu erkennen.

Die Entfernung zwischen dem Schiff und einem beliebigen Punkt P im Infrarotbild kann mittels sphärischer Trigonometrie unter Zuhilfenahme des Winkels zwischen dem Punkt P und dem Horizont errechnet werden (innerhalb  $\pm 0.03^\circ$ ). Hierbei können Entfernungen genauer bestimmt werden als mit 7x50 und mit "Big-Eye" Ferngläsern.

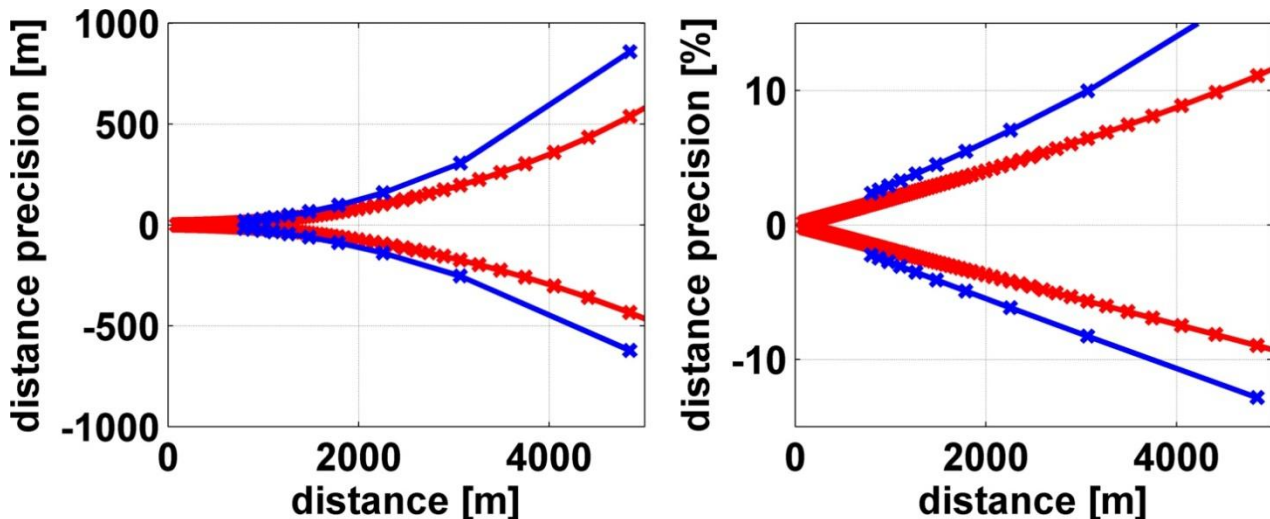


Abbildung 6-8 Rot: Absolute (A) und relative (B) Präzision der Entfernungsbestimmung des IR Systems. Aufgrund der verwendeten nichtlinearen sphärischen Triangulation ist der absolute Fehler entfernungsabhängig. Für Entfernungen kleiner 5 km sind die relativen Fehler geringer als 12%. Blau: Ebenso für 7x50 Fernglas mit auf  $\frac{1}{4}$  Strichelung interpolierter Winkelbestimmung.

### 6.3 Diskussion

Das IR System konnte 92% der 34 Schiff-Wal Begegnungen, die von einem visuellen Warmblüter-Beobacherteam über die gesamte Reise (Tageslicht und fahrendes Schiff voraussetzend) hinweg mittels Streifenbeobachtungen (Beobachtungszeit 299h) von der Brücke aus erhoben wurden, automatisch detektieren [Zitterbart et al., 2013b]. Das IR-System konnte im Entfernungsbereich bis zu 5 km ohne substantiellen Effizienzverlust automatisch mehr als doppelt so viele überprüfte Walblase ( $N_{IR} = 684$ ,  $N_{vis} = 303$ ) detektieren, als zwei alarmierte, dedizierte visuelle Walbeobachter [Zitterbart et al., 2013b] Abbildung 6-5B zeitgleich erkennen konnten. Das IR System erlaubt somit eine genaue Übersicht aller gleichzeitigen Schiff-Wal-Begegnungen in komplexen Situationen. (Es sei darauf hingewiesen, dass die oben genannten visuellen Erhebungen durch Warmblüter- und dedizierte Walbeobachter nicht im Rahmen des parallelen ITAW Projektes erfolgt sind (vergleiche hierzu auch [Boebel et al., 2011; Lehnert et al., 2011; Lehnert et al., 2012; Verbelen and Haelters, 2012]) und die hier beschriebenen Vergleiche nicht mit den weiter unten beschriebenen Vergleichen identisch sind. Die Zahl der Fehlalarme in den analysierten Zeiten lag bei 6 pro Stunde. Die Validierung eines Walblases im thermographischen Bild erfordert jedoch nur einige Sekunden und erlaubt schnelle und nachvollziehbare Entscheidungen des Operators ob die hydroakustischen Schallquellen abgeschaltet werden sollen oder nicht.

Offen bleibt die Frage nach der oberen Schranke der Wassertemperatur und der minimalen Größe des marinen Säugers für eine zuverlässige Detektion. Die hier präsentierten Ergebnisse wurden unter einer begrenzten Anzahl von Umweltbedingungen und Walarten gewonnen. Die Wassertemperaturen lagen hauptsächlich zwischen  $-2$  und  $+10^\circ\text{C}$ , die Windgeschwindigkeiten unter 7Bft und die beobachteten Arten waren hauptsächlich Großwale wie Buckelwal, Zwergwal

und Finnwal. Eine Evaluierung der Leistungsfähigkeit von IR-Kamera und Detektionsalgorithmus für andere, insbesondere kleinere Wal- oder ggf. Robbenarten und höhere Wassertemperaturen erfordern weitergehende Studien. Die bisherigen Ergebnisse zeigen, dass das IR System für Großwale in polaren und subpolaren Gebieten sehr gut funktioniert und einen wesentlichen Fortschritt bei der nächtlichen Waldetektion darstellt. Für den operationellen Betrieb des IR-Systems an sich, genügt es, wenn eine Person des an Bord vorhandenen wiss. Personals angelernt wird. Diese kann Teil des das IR nutzenden MMO Teams von mindestens 2 Personen sein. Die Standzeiten der von RDE aufgelegten neuen Generation von IR-Sensorköpfen soll 1 Jahr betragen.

## 6.4 Zusammenfassung

Um die Präsenzerfassung von marinen Säugern, vor allem im Kontext von Mitigationsanwendungen zu optimieren wurde im Rahmen dieses Projektes das weltweit erste, schiffsbasierte automatische Waldetektionssystem entwickelt und evaluiert. Das System fußt auf einer 360°-rotierenden Infrarotkamera und einem computerbasiertem Algorithmus der Walblase anhand ihrer Signatur automatisch erkennt. Das System ist unabhängig vom Tageslicht und weist innerhalb eines Radius von mehreren Kilometern eine nahezu entfernungsunabhängige Detektionswahrscheinlichkeit für Großwale (inkl. Zwergwal) auf.

Mit dem Detektionsalgorithmus wurden bislang mehr als 4500 Walblase in bis zu 5500 m Entfernung entdeckt. Die Walblase wurden während mehr als 300 Schiff-Wal-Begegnungen, mit und ohne Tageslicht und unter verschiedensten Umweltbedingungen aufgenommen (Wassertemperaturen von -2 - 18°C, Windgeschwindigkeiten von 0 – 6 Bft). Die Leistungsfähigkeit des Klassifikators wird durch die ROC-Kurve (Receiver-Operator-Characteristic) für falsch-positive und richtig-positive Ereignisse quantifiziert. Die Klassifikationsleistung war bei Blasen in Dunkelheit besser als bei Walblasen, die bei Tageslicht aufgenommen wurden. Dies liegt wahrscheinlich an den tagsüber vorhandenen Lichtreflexionen auf der Wasseroberfläche, und der damit höheren Anzahl an Fehlalarmen. Das IR System konnte 92% der 34 Schiff-Wal Begegnungen, die von einem visuellen Warmblüter (i.e. Marine Säuger und Seevögel) Beobacherteam über eine gesamte Reise hinweg (Tageslicht und fahrendes Schiff voraussetzend) mittels Streifenbeobachtungen (Beobachtungszeit 299h) erhoben wurden, automatisch detektieren [Zitterbart *et al.*, 2013b]. Offen bleibt die Frage nach der oberen Schranke der Wassertemperatur und der für eine zuverlässige Detektion minimalen Größe des marinen Säugers, da die hier gewonnenen Daten hauptsächlich bei Wassertemperaturen zwischen -2 und +10°C und für Großwale aufgenommen wurden. Insgesamt ist jedoch festzuhalten, dass das System im Kontext von Mitigationsbeobachtung sich hervorragend als Assistenzsystem eignet, um die Effizienz einzelner Walbeobachter auf der Brücke zu erhöhen und Mitigationsentscheidungen zu substantiieren und zu dokumentieren.

## 6.5 Ausblick

Der Einfluss von Schiffslärm auf die marine Fauna kann unter vielerlei Gesichtspunkten betrachtet werden, von denen jedoch kurzfristige kinematische bzw. akustische Verhaltensreaktionen (Ausweichen oder Annähern an das Schiff, Verminderung oder Verstärkung der Vokalisationen) und langfristige distributive (Vermeidungsreaktionen) Auswirkungen am plausibelsten erscheinen. Kurzfristige kinematische Verhaltensänderungen im Nahbereich des Schiffes sind mit den photometrischen Möglichkeiten des entwickelten IR-Systems im Prinzip gut zu erfassen, und es scheint lediglich eine Frage der Zeit zu sein, bis ein substanzieller Datensatz akquiriert ist, der eine belastbare statistische Analyse erlaubt.

Das im Rahmen dieses Projektes entwickelte automatische Wale detektionssystem hat gezeigt, dass es Großwale in den Freiwasserbereichen der Antarktis innerhalb eines Radius von ca. 3 km zuverlässig detektieren kann. Es ist geeignet Walbeobachtungen zu Mitigationzwecken im Rahmen wissenschaftlicher Seismik im Südozean Tag und Nacht zu unterstützen. Zur Verbesserung der Effizienz der Walforschung in der Antarktis gilt es, den Detektor in Hinblick auf stark mit Eis versetzte Gebiete zu verbessern (was sich von selbst mit sich verbessernden Rechenleistungen lösen wird) und die Ankopplung der zweiten visuellen Kamera zur Artbestimmung (des sogenannten PIP (engl. Picture In Picture) Systems) weiter zu optimieren um automatisch Distance Sampling Daten erheben zu können. Durch die genaue Entfernungs- und Winkelbestimmung lassen sich detaillierte Zeitverläufe und georeferenzierte Karten der Schiffs-Wal-Begegnung erstellen (z.B. Abbildung 6-6), woraus Erkenntnisse über kinematische Verhaltensreaktionen, Atemfrequenzen (die Zeitspannen zwischen einzelnen Cues) und Tauchzyklen (längere zeitliche Lücken in den Detektionen) der Tiere gewonnen werden. Im allgemeinen Kontext des Walschutzes weltweit sollten zukünftige Studien auch darauf abzielen, die Effizienz und Zuverlässigkeit des Systems in Hinblick auf andere Einsatzprofile hin zu optimieren, z.B. für Großwale in seismisch stark belasteten, subtropischen und subpolaren Ozeanregionen oder für Schweinswale in Nord- und Ostsee.

## 7 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Lfd. Nr.	Bezeichnung des Gegenstandes	Lieferfirma	weitere Verwendung	Kosten [€] (Anteil BMBF)
1	FIRST System/IR Bilderfassungssystem	RDE	Nutzung auf Polarstern	1.016.068,53
2	Datenhaltungs- und Analysesystem	Datagroup	Datenanalyse am AWI	20.780,12
3	Ersatz Sensorkopf f. FIRST-NAVY, anteilig	RDE	Nutzung auf Polarstern	250.000,00

## 8 Notwendigkeit und Angemessenheit

Die Ergebnisse zeigen, dass eine erfolgreiche automatische Detektion nur mit Hilfe eine gekühlten, 360°-aufnehmenden Sensorkopf möglich ist. Da das FIRST System weiterhin das weltweit einzige System ist, dass diesen Anforderungen Genüge tut, war die Investition in dieses System notwendig. Die Kosten des Vorhabens sind im Vergleich mit dem Nutzwert (1 Stunde Ausfallzeit eines kommerziellen, Seismik-Schiffes liegt bei ca. 40.000 €) angemessen. Aus wissenschaftlicher Sicht hilft das System die Genehmigungsfähigkeit von Forschungsseismik durch deutsche Institutionen (AWI, BGR) zu verbessern bzw. sicherzustellen.

## 9 Darstellung voraussichtlichen Nutzens

Die wirtschaftlichen Erfolgsaussichten haben sich konkretisiert. AWI und RDE haben eine Lizenzvereinbarung für Nutzungsrechte der am AWI entwickelten Software Tashtego durch RDE (Vertrieb zusammen mit FIRST Navy Hardware zum Zwecke des Walschutzes) unterzeichnet. RDE hat eine Marktstudie erhoben und ist basierend auf deren Ergebnis sehr an der Vermarktung dieses Systems interessiert. Hierzu wurde von RDE eine (zivile) Person zur Kundenbetreuung für



ausschließlich dieses System eingestellt. Für 2015 zeichnen sich bislang Interessenten für 2-3 Systeme ab.

Weiter besteht konkretes Interesse (von Shell) an einer Erweiterung des Detektors auf die Erfassung von auf dem Eis liegenden Robben, generell der Nutzung des Systems in warmen Gewässern durch die kommerzielle Seismik, sowie an einem (ausschließlich) vorausschauenden System zur Kollisionsvermeidung (für Schnellfähren bei den Kanaren).

## 10 Bekannt gewordener Fortschritt bei anderen Stellen

Zwischenzeitlich wurden 2 Konferenzbeiträge bekannt, welche ebenfalls einen Algorithmus zur Detektion von Walblasen in Infrarotbildern detektieren. Die Autoren verwenden 1998 aufgenommene Daten einer stationären niedrigauflösenden Kamera. Der gewählte Ansatz hat nicht den Anspruch einer Echtzeitverarbeitung, sondern beruht auf retrospektiver Verarbeitung der Daten zur Untersuchung von Walmigrationen und steht damit nicht in Konkurrenz zu Tashtego.

Varun Santhaseelan, Saibabu Arigela, Vijayan K. Asari, Neural Network Based Methodology for Automatic Detection of Whale Blows in Infrared Video, Advances in Visual Computing, Lecture Notes in Computer Science Volume 7431, 2012, pp 230-240

Varun Santhaseelan, Vijayan K. Asari, "Whale blow detection in infrared video using fractal analysis as tool for representing dynamic shape variation," wacv, pp.520-525, 2013 IEEE Workshop on Applications of Computer Vision (WACV), 2013.

## 11 Erfolgte /geplante Veröffentlichungen

### 11.1 Veröffentlichungen

Zitterbart, D. P., Kindermann, L., Burkhardt, E. and Boebel, O. (2013), PLoS ONE. doi:10.1371/journal.pone.0071217, hdl:10013/epic.41931

Boebel, O. and Zitterbart, D. (2013) 24/7 Automatic Detection of Whales Near Seismic Vessels Using Thermography, 75th EAGE Conference & Exhibition, D06. hdl:10013/epic.41630

Burkhardt, E., Kindermann, L., Zitterbart, D. and Boebel, O. (2012) Detection and Tracking of Whales using a shipborne 360° thermal-imaging system, In: Popper, A. N. and Hawkins, A. (editors): The Effects of Noise on Aquatic Life, The Effects of Noise on Aquatic Life, New York, Springer Science + Business Media LLC, 695 p., ISBN: 978-1-4419-7310-8. doi:10.1007/978-1-4419-7311-5\_66, hdl:10013/epic.41818

Weissenberger, J. and Zitterbart, D. P. (2012) Surveillance of Marine Mammals in the Safety Zone around an Air Gun Array with the Help of a 360° Infrared Camera System, SPE/APPEA International Conference on Health, Safety, and Environment in Oil and Gas Exploration and Production. doi: 10.2118/158038-MS

Zitterbart D. P., Kindermann L., Boebel O. (2011). MAPS: An automated whale detection system for mitigation purposes. 67-71. SEG Expanded Abstracts 30, 67 (2011)

### 11.2 Patente

Zitterbart, D. P., L. Kindermann, and O. Boebel (2013a), Method for automated real-time acquisition of marine mammals edited, US Patent 20,130,070,079.

### 11.3 Fahrtberichte

Boebel O., Bombosch A., Burkhardt E., Cammereri A., Kindermann L., Richter S., Zitterbart DP. MAPS: Marine Mammal Perimeter Surveillance, in The Expedition of the Research Vessel "Polarstern" to the Antarctic in 2012/13 (ANT-XXIX/2), edited by O. Boebel p. 99, Reports on Polar and Marine Research, 671, 64 - 70 , 2013

Burkhardt E., Lanfredi L., Richter S., Boebel O., Kindermann L., Zitterbart DP. MAPS: Marine Mammal Perimeter Surveillance, in The Expedition of the Research Vessel "Polarstern" to the Antarctic in 2011/12 (ANT-XXVIII/4), edited by M. Lucassen p. 94, Reports on Polar and Marine Research, 652, 59 - 65 , 2012

Richter S., Mueller M., Boebel O., Kindermann L., Zitterbart DP. MAPS: Marine Mammal Perimeter Surveillance, in The Expedition of the Research Vessel "Polarstern" to the Antarctic in 2011/12 (ANT-XXVIII/2), edited by G. Kattner p. 99, Reports on Polar and Marine Research, 646, 56 - 62 , 2012

Boebel O., Bombosch A., Kindermann L., Zitterbart DP. MAPS: Marine Mammal Perimeter Surveillance, Reports on Polar and Marine Research, 634, 102 - 110, 2011.

Boebel O., Kindermann L., Monsees M., Richter S., Torres Vega M., Zitterbart D.P. MAPS: Marine Mammal Perimeter Surveillance Reports on Polar and Marine Research, 628, 69 - 75, 2011.

Zitterbart DP., Kindermann L., Boebel O. MAPS: Marine Mammal Perimeter Surveillance Reports on Polar and Marine Research, 617, 118 - 124, 2010.

Burkhardt E., Kindermann L., Zitterbart DP., Reimann A. MAPS: Marine Mammal Perimeter Surveillance Reports on Polar and Marine Research, 612, 31-34, 2010.

### 11.4 Präsentationen

Zitterbart DP. and Boebel O., Automatic detection and identification of whales using thermal and visual imaging techniques for cetacean censuses and marine mammal mitigation  
**Ocean Science Meeting 2014, Hawaii, 27. February 2014**

Zitterbart DP. and Boebel O., Remote Sensing of Whales Using Thermal and Visual Imaging  
**Ocean and Resources Engineering Seminar, SOEST, University of Hawaii, Hawaii, 26. February 2014**

Boebel, O. and Zitterbart, D. (2013), 24/7 Automatic Detection of Whales Near Seismic Vessels Using Thermography, **75th EAGE Conference & Exhibition**, D06 .  
hdl:10013/epic.41630

Weissenberger, J. and Zitterbart, D. P. (2012), Surveillance of Marine Mammals in the Safety Zone around an Air Gun Array with the Help of a 360° Infrared Camera System,  
**SPE/APPEA International Conference on Health, Safety, and Environment in Oil and Gas Exploration and Production** . doi:10.2118/158038-MS , hdl:10013/epic.41964

Zitterbart, D. P. , Richter, S. , Kindermann, L. , Bombosch, A. , Burkhardt, E. , Schneider, W., Wienecke, B. , Butler, J. T. , Fabry, B. and Boebel, O. (2012), Learning from images – how remotely operated observatories help to understand animal behavior in polar regions, **IPY 2012**, Montreal . hdl:10013/epic.39505

Zitterbart DP., Kindermann L., Boebel O., MAPS-IR: an Automated Whale Detection System for Mitigation Purposes.  
**Society of Exploring Geophysicists (SEG), San Antonio, USA, September 2011**

Zitterbart DP., Kindermann L., Boebel O., MAPS-IR: Automatic whale detection and identification using a shipborne 360° High Resolution Thermal Imager..

**Effects of Sound in the Ocean on Marine Mammals, ESOMM 2011, Amsterdam, Netherlands, September 2011**

Weissenberger, J. , Blee, M. , Christensen, J. , Hartin , K. , Ireland, D. and Zitterbart, D. P. (2011), Monitoring for marine mammals in Alaska using a 360° infrared camera system, **19th Biennial Conference, Society of Marine Mammalogy**, Tampa, FL, USA, 9 December 2011 - 13 December 2011 . hdl:10013/epic.41960

Kindermann, L. , Zitterbart, D. P. , Burkhardt, E. and Boebel, O. (2010), Detection and Tracking of Whales Using a Ship-based 360° Thermal Imaging System, **Internationale Polartagung der Deutschen Gesellschaft für Polarforschung**, Obergurgl, Austria, 6 September 2010 - 10 September 2010 . hdl:10013/epic.40540

Burkhardt, E. , Kindermann, L. , Zitterbart, D. and Boebel, O. (2010), Detection and Tracking of Whales Using a Ship-based, 360° Thermal Imaging System., **Second International Conference - The Effects of Noise on Aquatic Life-** Cork, Ireland, August 15-20 . hdl:10013/epic.35895

Zitterbart, D. , Kindermann, L. , Burkhardt, E. and Boebel, O. (2010), Automated whale detection and local, high resolution ice mapping using a 360° ship-based thermal imager., **IPY Polar Science Conference**, New frontiers, data practices and directions in polar research, Oslo 2010. hdl:10013/epic.37532

Zitterbart, D. P. , Kindermann, L. , Boebel, O. and Fabry, B. (2010), Image Processing in Polar Science - how to find and observe whales and penguins., **British Computer Society, International Summer-School for Pattern Recognition**, Plymouth, UK . hdl:10013/epic.39815

Boebel, O. (2009), Detecting Whales by Thermal Imaging: First Results from a Shipborne 360° High Resolution Thermal Imaging Camera Detecting Whale Blows in Arctic Waters, **3rd Intergovernmental Conference: The Effects of Sound in the Ocean of Marine Mammals (ESOMM 2009)**, Lercici, Italy.



## 12 Quellenverzeichnis

1. Baldacci, A., M. Carron, and N. Protunardo (2005), Infrared detection of marine mammals NURC Technical Report SR-443Rep., 40 pp, Nato Undersea Research Center, La Spezia, Italy.
2. Boebel, O., A. Bombosch, E. Burkhardt, L. Kindermann, and D. P. Zitterbart (2011), MAPS: Marine Mammal Perimeter Surveillance, in *The Expedition of the Research Vessel "Polarstern" to the Antarctic in 2010/11 (ANT-XXVII/2) Reports on Polar and Marine Research*, edited by E. Fahrbach, p. 102, Alfred-Wegener-Institut Helmholtz Zentrum für Polar- und Meeresforschung, Bremerhaven.
3. Buckland, S. T., D. R. Anderson, K. P. Burnham, J. L. Laake, D. L. Borchers, and L. Thomas (2001), *Introduction to distance sampling: estimating abundance of biological populations*, Oxford University Press, Oxford.
4. Chang, C.-C. a. L., Chih-Jen (2011), LIBSVM : a library for support vector machines, *ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology*, 2(3), 27:21--27:27.
5. Coppens, F. (1985), First arrival picking on common-offset trace collections for automatic estimation of static corrections, *Geophysical Prospecting*, 33, 1212-1231.
6. Cuyler, L. C., R. Wiulsrød, and N. A. Øritsland (1992), Thermal infrared radiation from free living whales, *Marine Mammal Science*, 8(2), 120-134.
7. Dalal, N., and B. Triggs (2005), Histograms of oriented gradients for human detection, IEEE.
8. Dollar, P. (2006), Piotr's Image & Video Matlab Toolbox, edited.
9. Felzenszwalb, P., D. McAllester, and D. Ramanan (2008), A discriminatively trained, multiscale, deformable part model, IEEE.
10. Graber, J., J. Thomson, B. Polagye, and A. Jessup (2011), Land-based Infrared Imagery for Marine Mammal Detection, paper presented at SPIE Photonics + Optics, San Diego, August 20-25 2011.
11. Greene, C. R., and S. C. Chase (1987), Infrared detection of whale spouts - a report on a feasibility studyRep., 52 pp, Greenridge Science Santa Barbara, CA.
12. Jones, M. J., and P. Viola (2001), Robust real-time object detection, *Workshop on Statistical and Computational Theories of Vision*.
13. Lehnert, L. S., H. Verdaat, D. Risch, C. Rocholl, A. Gilles, H. Herr, and U. Siebert (2011), Marine mammal survey, in *Reports on Polar and Marine Research - The Expedition of the Research Vessel "Polarstern" to the Antarctic in 2010/11 (ANT-XXVII/2)*, edited by E. Fahrbach, pp. 95-102, Alfred-Wegener-Institut Helmholtz-Zentrum für Polar und Meeresforschung, Bremerhaven.
14. Lehnert, L. S., S. Geelhoed, I. Gray, K. Lehnert, S. Plön, K. Schnidt, H. Verdaat, A. Gilles, H. Herr, and U. Siebert (2012), Distance sampling surveys for cetaceans in

Antarctic waters, in *The Expedition of the Research Vessel "Polarstern" to the Antarctic in 2011/12 (ANT-XXVIII/2)*, edited by G. Kattner, pp. 51-55, Alfred-Wegener-Institut fuer Polar- und Meeresforschung Bremerhaven.

15. Lerczak, J., A., and R. Hobbs, C. (1998), Calculating sighting distances from angular readings during shipboard, aerial, and shore-based marine mammal surveys, *Marine Mammal Science*, 14(3), 590-598.
16. Nowacek, D. P., L. H. Thorne, D. W. Johnston, and P. L. Tyack (2007), Responses of cetaceans to anthropogenic noise, *Mammal Review*, 37(2), 81-115.
17. Rowley, H., S. Baluja, and T. Kanade (1995), Human Face Detection in Visual Scenes *Rep.*, Carnegie Mellon University.
18. Santhaseelan, V., S. Arigela, and V. K. Asari (2012), Neural Network Based Methodology for Automatic Detection of Whale Blass in Infrared Video, 7431, 230-240.
19. Southall, B. L., et al. (2007), Marine mammal noise exposure criteria: initial scientific recommendations, *Aquatic Mammals*, 33(4 ), 411-521.
20. Verbelen, D., and J. Haelters (2012), At-Sea Distribution of Higher Trophic Levels: Seabirds Across the Southern Ocean (Atlantic Sector), in *The expedition of the research vessel "Polarstern" to the Antarctic in 2011/12 (ANT-XXVIII/2)*, edited by G. Kattner, p. 97, Alfred Wegener Institute for Polar and Marine Research, Bremerhaven.
21. Zitterbart, D. P., L. Kindermann, and O. Boebel (2013a), Method for automated real-time acquisition of marine mammals edited, US Patent 20,130,070,079.
22. Zitterbart, D. P., L. Kindermann, E. Burkhardt, and O. Boebel (2013b), Automatic Round-the-Clock Detection of Whales for Mitigation from Underwater Noise Impacts, *PLoS ONE*, 8(8), e71217.