



Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

# Eis-Vorhersage und Eis-Routen-Optimierung



---

## Entwicklung eines gekoppelten Eisvorhersage- und Routenoptimierungssystems

Förderkennzeichen: 03SX328A

HSVA Bericht Nr. 1680 / HSVA Bericht Nr. AT 571-15

Hamburg, 31.03.2015

**Nils Reimer,**

M. Dobrynin, B. Fock , R. Gerdes, A. Gierisch, G. Heygster, J. Holfort , P. Jochmann, L. Kaleschke, T. Kaminski, F. Kauker, C. Melsheimer, T. Pohlmann, H. Schlünzen, , J.Schwarz, J. Segschneider, K. Strübing, J.Tegtmeier

---





Gefördert durch:  
 Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie  
aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Entwicklung und Erprobung eines gekoppelten  
Eisvorhersage- und Routenoptimierungssystems

Förderkennzeichen: 03SX328A

31. März 2015

Hamburgische Schiffbau-  
Versuchsanstalt GmbH

Nils Reimer

**31. März 2015**

## Dokument-Kontrollblatt

<b>AP</b>	1-6
<b>AP-Leitung</b>	B. Fock, L. Kaleschke, N. Reimer, R. Gerdes, J. Holfort, J.H. Hellmann
<b>Berichtstitel</b>	Entwicklung eines gekoppelten Eisvorhersage- und Routenoptimierungssystems
<b>Datum</b>	31.03.2015
<b>Vertraulichkeit</b>	öffentlich
<b>Institution</b>	Hamburgische Schiffbau-Versuchsanstalt GmbH
<b>Autor</b>	Dipl.-Ing. Nils Reimer
<b>Dateiname</b>	V:\io\02Projekte\63_5020_524_BMWI_IRO2\30_Report\ Abschlussbericht\HSVA\ HSVA Bericht 1680 215-03-30

<b>Vers. Nr.</b>	<b>Datum</b>	<b>Fassung</b>	<b>Erstellt von</b>	<b>Geprüft von</b>	<b>Freigegeben von</b>
1.0	06.03.2015		NR		
2.0	20.03.2015		NR	CU	
3.0	30.03.2015		NR	CU	PJ



Gefördert durch:  
 Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie  
aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

## Entwicklung und Erprobung eines gekoppelten Eisvorhersage- und Routenoptimierungssystems

Förderkennzeichen: 03SX328A

31. März 2015

Hamburgische Schiffbau-  
Versuchsanstalt GmbH

Nils Reimer

<b>Zusammenfassung</b>	Innerhalb des Vorhabens Eisvorhersage und Eis-Routen-Optimierung (IRO-2), mit Laufzeit Oktober 2011 bis September 2014 wurde ein Prototyp für ein gekoppeltes Eisvorhersage und Routenoptimierungssystem für Schiffe entwickelt. Die Eisvorhersage wird durch Satellitendaten initialisiert und angetrieben und liefert die wesentlichen Eisparameter (Eiskonzentration, Eisdicke und Eisdrift) für den vorausliegenden Zeitraum von 3-6 Tagen. Die Daten dienen als Eingabe für ein Navigationsmodul, das die schiffsspezifische Geschwindigkeit in variierenden Eisbedingungen entlang unterschiedlicher Routenoptionen berechnen kann. Auf diesem Wege können Routen gezielt miteinander verglichen und optimiert werden. Die Ergebnisse der Routenoptimierung und Eisvorhersage können in elektronischen Seekarten an Bord angezeigt werden und somit der Schiffsführung direkt assistieren.
<b>Schlagworte</b>	Ice Forecast, Ice Route Optimization, Eisvorhersage und Routenoptimierung, Arktis, Schifffahrt, Satellitenfernerkundung



Gefördert durch:  
 Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie  
aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Entwicklung und Erprobung eines gekoppelten  
Eisvorhersage- und Routenoptimierungssystems

Förderkennzeichen: 03SX328A

31. März 2015

Hamburgische Schiffbau-  
Versuchsanstalt GmbH

Nils Reimer

## Inhaltsverzeichnis

<b>Vorbemerkung:</b> .....	<b>10</b>
<b>1. Einleitung, Präsentation des Vorhabens</b> .....	<b>10</b>
1.1 Kurzbeschreibung .....	10
1.2 Aufgabenstellung .....	10
1.3 Voraussetzungen und Stand der Technik .....	13
1.4 Planung und Ablauf des Vorhabens .....	13
1.5 Wissenschaftlicher und technischer Stand an den angeknüpft wurde ....	18
1.6 Zusammenarbeit mit anderen Stellen .....	20
<b>2. Eingehende Darstellung des Vorhabens</b> .....	<b>21</b>
2.1 Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse im Einzelnen .....	21
2.1.1 AP2 Satellitenfernerkundung und Modellantrieb .....	21
Schneeauflage auf Meereis .....	24
2.1.2 AP 2 Arktisweite grobskalige Eisvorhersage und Validierung .....	30
2.1.3 AP 1 Regionales Eisvorhersagemodell HAMMER .....	36
Spezifikation und Anwendung .....	37
Bewertung .....	39
2.1.4 AP3 Routenoptimierungssystem .....	41
2.1.5 Eisklassifizierung von SAR-Daten, Darstellung von Eiskarten .....	50
2.1.6 AP6 Erprobung des Prototypen mit Forschungsschiff Lance .....	63
2.2 Notwendigkeit und Angemessenheit der Arbeiten .....	80
2.3 Voraussichtlicher Nutzen insbesondere Verwertbarkeit der Ergebnisse im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplanes .....	81
2.4 Während der Durchführung des Vorhabens dem Zahlungsempfänger bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet bei anderen Stellen .....	82
2.5 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse .....	84
Danksagungen: .....	86
<b>Literatur</b> .....	<b>87</b>
<b>Anlagen</b> .....	<b>90</b>





Gefördert durch:  
 Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie  
aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

## Entwicklung und Erprobung eines gekoppelten Eisvorhersage- und Routenoptimierungssystems

Förderkennzeichen: 03SX328A

31. März 2015

Hamburgische Schiffbau-  
Versuchsanstalt GmbH

Nils Reimer

---

1.	Erfolgskontrollbericht .....	90
1.1	Beitrag zu den förderpolitischen Zielen .....	90
2.	Berichtsblatt für deutsche Veröffentlichungen.....	99
3.	Document Control Sheet für englische Veröffentlichungen .....	100



Gefördert durch:  
 Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie  
aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Entwicklung und Erprobung eines gekoppelten  
Eisvorhersage- und Routenoptimierungssystems

Förderkennzeichen: 03SX328A

31. März 2015

Hamburgische Schiffbau-  
Versuchsanstalt GmbH

Nils Reimer

## Abbildungen

Abbildung 1 Prinzip des im Vorhaben entwickelten Systems [1] .....	11
Abbildung 2 Flussdiagramm zur Darstellung der Prozesskette [1] .....	12
Abbildung 3 Zusammenwirken der Arbeitspakete [1] .....	14
Abbildung 4 Ablaufplan des Vorhabens, Überprüfung des Erreichens der Ziele [1] .....	15
Abbildung 5 Aufbau des Verbundes und TWB [1] .....	17
Abbildung 6 Auszug aus den Ergebnissen der Befragung nautischer Offiziere [2] .....	18
Abbildung 7 IRO-2 Untersuchungsgebiet am 23. März 2014: .....	23
Abbildung 8 Daten-Übersicht der Feldkampagne 18-26 März 2014: .....	24
Abbildung 9 Schiffsgestützte EM-31 Messungen gemittelt über 30 Meter. ....	24
Abbildung 10: Schneedicke (links), Schneekorngöße (rechts), Laptevsee, 1. Mai 2010 .....	29
Abbildung 11: Schneedicke (links), Schneekorngöße (rechts), Laptevsee, 11. Mai 2010 .....	30
Abbildung 12 Differenz zwischen Modell und Beobachtungsdaten (Misfit) für die Schneedicke (oben links) und die Eiskonzentration (unten links) am 24.3.2011, sowie Gradient der Kostenfunktion bzgl. der initialen Schneedicke (oben Mitte), des Niederschlages am 24.3.2011 (oben rechts), und der initialen Eiskonzentration (unten Mitte). ....	31
Abbildung 13 Der zeitliche Ablauf der Prozesskette .....	32
Abbildung 14 Die totale Kostenfunktion sowie die einzelnen Beiträge der verschiedenen Beobachtungsgrößen und der 'prior'-Term vor der Assimilierung (schwarz), nach 30 Iterationen (grün) und nach 100 Iterationen (rot) .....	33
Abbildung 15 Die Eisdicke [m] am 15. März 2013 im Kontrolllauf (links) und in einem optimierten Lauf (rechts, nach 30 Iterationen) .....	34
Abbildung 16 Die Schneedicke [m] am 15. März 2013 im Kontrolllauf (links) und in einem optimierten Lauf (rechts, nach 30 Iterationen) .....	35
Abbildung 17 Zeitliche Entwicklung der Kostenfunktion (Abweichung zwischen Modellergebnissen und Beobachtungen, Summe über alle Modellgitterpunkte für die zum jeweiligen Zeitpunkt Beobachtungen zur Verfügung standen).	



Gefördert durch:  
 Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie  
aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

## Entwicklung und Erprobung eines gekoppelten Eisvorhersage- und Routenoptimierungssystems

Förderkennzeichen: 03SX328A

31. März 2015

Hamburgische Schiffbau-  
Versuchsanstalt GmbH

Nils Reimer

Dargestellt sind das Mittel über die 22 Analysen und Vorhersagen aller Starttage (14.3.2014 - 5.4.2014, Linien) für jeweils 14 Tage sowie deren Standardabweichung (vertikale Balken). Hierbei zeigen die Tage 1-7 die Werte für die Assimilationsläufe, die Tage 8-14 für die Echtzeitvorhersagen während der IRO-2 Testfahrt angetrieben mit ECMWF Vorhersagen (rot) bzw. mit ECMWF Analysen für den gleichen Zeitraum nachgerechnet (sogenannte Handsatz, schwarz)..... 36

Abbildung 18 Modell-Region der HAMMER-Komponenten MESIM-METRAS (Meereis/Atmosphäre) und HAMSOM (Ozean) mit der Route von R/V Lance (rot: im Eis, schwarz außerhalb). ..... 37

Abbildung 19 Struktur und Datenfluss zum Betrieb des HAMMER Modells ..... 38

Abbildung 20 Beispiel-Vorhersage der Eiskonzentration, Modell-Lauf vom 15. März 6 Uhr: a) nach 18 Stunden, b) nach 3 Tagen. .... 39

Abbildung 21 Datenfluss zwischen regionalen Eismodell, Routenoptimierung und Schiff ..... 42

Abbildung 22 Modellversuche in unterschiedlichen Eisformationen ..... 44

Abbildung 23 Widerstand in Abhängig der Eiskonzentration und Geschwindigkeit ..... 45

Abbildung 24 Ermittlung der erreichbaren Geschwindigkeit in unterschiedlichen Eisbedingungen ..... 45

Abbildung 25 Schiffsspezifische, erreichbare Geschwindigkeit über Eiskonzentration ..... 46

Abbildung 26 Zusatzwiderstand in Abhängigkeit des seitlichen Drucks [3] ..... 46

Abbildung 27 Berechnung der Fahrtzeit entlang einer Route auf den Gitterpunkten des Eismodells unter Berücksichtigung unterschiedlicher Zeitschritte ..... 47

Abbildung 28 Fenster um Wegepunkte zur Ermittlung der Eisverhältnisse [4] .. 48

Abbildung 29 Ausgangsrouten (beige) und modifizierte Route (blau) [4] ..... 48

Abbildung 30 Ausgangsrouten (beige) und geglättete Routenalternative (blau) [4] ..... 49

Abbildung 31 Verminderung der Fahrtzeit bei Verlängerung der Strecke..... 49

Abbildung 32 Darstellung der kürzesten und modifizierten Route in der ENC.... 50

Abbildung 33 Prozessierungsübersicht..... 53



Gefördert durch:  
 Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie  
aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

## Entwicklung und Erprobung eines gekoppelten Eisvorhersage- und Routenoptimierungssystems

Förderkennzeichen: 03SX328A

31. März 2015

Hamburgische Schiffbau-  
Versuchsanstalt GmbH

Nils Reimer

Abbildung 34 Korrektur der Einfallswinkelabhängigkeit.....	55
Abbildung 35 Niederschlagseffekte im SAR-Bild .....	56
Abbildung 36 Windeffekte im SAR-Bild .....	56
Abbildung 37 Frostblumen auf dünnem Eis (dunkles Nilas), .....	57
Abbildung 38 Visualisierung der Eisinformationen in geotif Dateien zur darstellung an Bord (Eiskonzentration, Entwicklungszustand Eisdrift und Konvergenz) .....	61
Abbildung 39 Fahrtverlauf östlich von Spitzbergen (links), technische Daten RV Lance (rechts) .....	64
Abbildung 40 Typische Eisformationen während der Erprobungsfahrt .....	65
Abbildung 41 Eisdickenmessung mit dem EM31 (oben), Eisbeobachtungen (unten) .....	66
Abbildung 42 Von Bord aus durchgeführte Messungen während der Erprobungsfahrt [24] .....	68
Abbildung 43 Verteilung der Eiskonzentration aus Beobachtung, mangelnde Repräsentativität der Beobachtungen im Vergleich zur Gesamtbedeckung einer Gitterzelle.....	70
Abbildung 44 Unterschiedlich gute Übereinstimmung der beobachteten und gemessenen Eisdicken für ebenes und deformiertes Eis .....	71
Abbildung 45 Vergleich der Eisbrechfähigkeit aus Prognose und Beobachtung / Messung.....	72
Abbildung 46 Darstellung der Ausgangsrouten sowie zweier Optionen in ENC ....	73
Abbildung 47 Prognostizierter Verlauf von Eiskonzentration und Eisdicke, alle Optionen .....	74
Abbildung 48 Prognostizierter Widerstands- und Geschwindigkeitsverlauf aller Optionen .....	75
Abbildung 49 Beobachteter / gemessener Eisdickenverlauf (Eis + Schnee) .....	76
Abbildung 50 Ermittelte Geschwindigkeitsverlauf auf der Route.....	76
Abbildung 51 Ebenes Eis (rechts) und Schollenfeld (links) .....	77
Abbildung 52 Geschwindigkeitsaufzeichnung im Presseisrücken, 19.03.2014 ...	78
Abbildung 53 Anhaftendes Eis am Rumpf der Lance, erhöhter Widerstand durch Eiskeil .....	78



Gefördert durch:  
 Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie  
aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Entwicklung und Erprobung eines gekoppelten  
Eisvorhersage- und Routenoptimierungssystems

Förderkennzeichen: 03SX328A

31. März 2015

Hamburgische Schiffbau-  
Versuchsanstalt GmbH

Nils Reimer

---

## Tabellen

Tabelle 1 Parameteranforderungen der Routenoptimierung .....	41
Tabelle 2 Übersicht der durchgeführten Modellversuche .....	43
Tabelle 3 Ergebnisse der Testrechnungen mit unterschiedlichen .....	50
Tabelle 4 Beobachtete Eiskonzentration über den Fahrtverlauf .....	67
Tabelle 5 Beobachteter Entwicklungszustand des Eises über den Fahrtverlauf ..	67
Tabelle 6 Abgefahrene Routenvorschläge .....	73
Tabelle 7 Verwertungsmöglichkeiten aus den Projektergebnissen .....	81
Tabelle 8 Anknüpfungspunkte bei einzelnen Aufgaben.....	94



Gefördert durch:  
 Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie  
aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Entwicklung und Erprobung eines gekoppelten  
Eisvorhersage- und Routenoptimierungssystems

Förderkennzeichen: 03SX328A

31. März 2015

Hamburgische Schiffbau-  
Versuchsanstalt GmbH

Nils Reimer

## **Vorbemerkung:**

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie unter dem Förderkennzeichen 03SX328A gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

## **1. Einleitung, Präsentation des Vorhabens**

### **1.1 Kurzbeschreibung**

Innerhalb des Verbundvorhabens Eisvorhersage und Eis-Routen-Optimierung (IRO-2) wurde ein Prototyp für ein gekoppeltes Eisvorhersage und Routenoptimierungssystem für die Schifffahrt in polaren Gewässern entwickelt. Das System nutzt Daten aus der Fernerkundung zum Antrieb und zur Initialisierung einer arktisweiten Eisvorhersage, die wiederum die Rand- und Anfangsbedingungen für ein regionales, hochaufgelöstes Eismodell bereitstellt. Aus diesem regionalen Eismodell können die relevanten Parameter wie Eiskonzentration, Eisdicke und Eisdrift gewonnen werden, die der Eis-Routen Optimierung als Eingabe dienen. Die Routenoptimierung erstellt dann zwischen einem vorgegebenen Start und Endpunkt mehrere Routenvorschläge und vergleicht diese hinsichtlich ihrer benötigten Fahrtzeit. Die tatsächliche Eisbrechfähigkeit des Schiffes wird ebenfalls als weitere Eingabe in der Berechnung und Auswahl der Routen berücksichtigt.

### **1.2 Aufgabenstellung**

Aus der Abnahme der permanenten Eisbedeckung der Arktis, vor allem dem starken Rückzug des Eises auf der eurasischen Seite in den Sommermonaten ergibt sich eine Verlängerung der befahrbaren Periode durch Schiffe entlang der Nordostpassage. Dies stellt einen Anreiz zur Nutzung dieser Routen als Alternative zu der herkömmlichen Route von Europa nach Ostasien durch den Suezkanal dar. Allerdings ist dem Vorteil durch den kürzeren Weg ein erhöhtes Risiko durch die Variabilität der Eisverhältnisse und damit eine Unsicherheit bei der tatsächlich erreichbaren Geschwindigkeit gegenüberzustellen.

Als ein wesentlicher Punkt zur Verbesserung der Planbarkeit und Effizienzsteigerung der Schifffahrt entlang der Nordostpassage und anderen eisbedeckten Gewässern sollte daher im Vorhaben IRO-2 eine Unterstützung für

die Navigation im Eis entwickelt werden. Die Navigationshilfe wurde in Form einer Routenoptimierung basierend auf einem Eisvorhersagemodell realisiert [1].

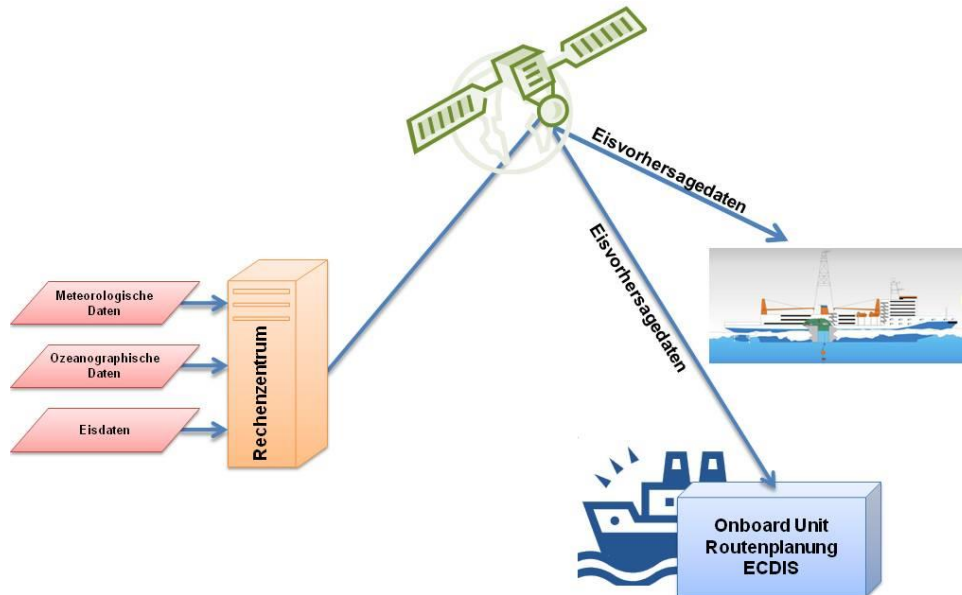


Abbildung 1 Prinzip des im Vorhaben entwickelten Systems [1]

Die Simulation der relevanten Eisparameter und deren dynamischem Verhalten im Ozean in einem numerischen Modell ist dabei nur durch Einbindung möglichst hochauflöster, satellitengestützter Eisinformationen möglich. Diese fließen zusammen mit Wetter- und Ozeandaten im Vorhaben in ein arktisweites Vorhersagemodell ein. Das Modell soll in der Lage sein, die Eisbedeckung, Eisdicke und Eisdynamik unter Berücksichtigung des Einflusses aus Atmosphäre und Ozean abzubilden und Veränderungen für die nahe Zukunft zu simulieren. Eine Verbesserung der Stabilität und Genauigkeit des stark datengetriebenen Modells wird hierbei durch Datenassimilierung erzielt.

Das arktisweite Modell liefert seinerseits Randbedingungen für ein regionales Eiseisvorhersagemodell mit einer höheren Auflösung von  $5 \times 5 \text{ km}^2$ . In diesem Modell können die Eiskonzentration und Eisdicke auf kleineren Gitterzellen berechnet werden. Als Ziel wurde eine Vorhersage für die kommenden 3-6 Tage angestrebt.

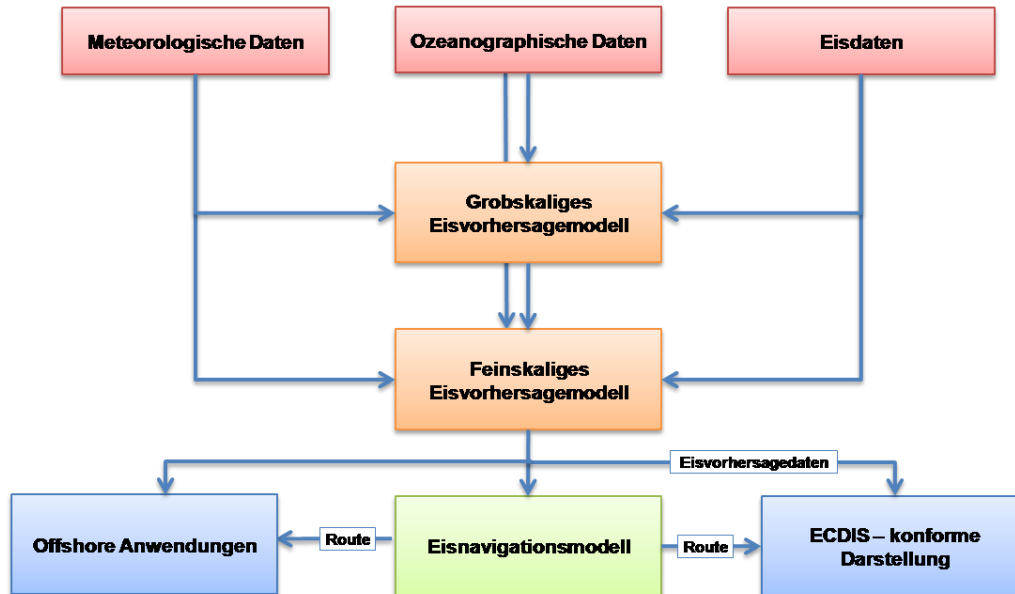


Abbildung 2 Flussdiagramm zur Darstellung der Prozesskette [1]

Die vorhergesagten Eisbedingungen dienen im nächsten Schritt als Eingabe für das Routenoptimierungssystem. Dieses gliedert sich in zwei Stufen:

- Die Berechnung der erreichbaren Geschwindigkeit in unterschiedlichen Eisverhältnissen
- Die hierauf basierende Optimierung der Route zwischen vorgegebenem Start und Endpunkt

Um die Eisvorhersage samt optimierter Routen als Navigationshilfe an Bord von Schiffen nutzen zu können, müssen diese in einem geeigneten Format vorliegen, in möglichst kurzer Zeit auf das Schiff übertragen werden und dort auf den ENC Geräten visualisierbar sein.

Als Gesamtaufgabe stellt sich neben der Entwicklung der Einzelkomponenten, (Eingabe- und Antriebsdaten, arktisweites Modell, regionales Vorhersagemodell, Routenoptimierung und Darstellung der Eisinformationen und Routen in ENC) vor allem auch die Verknüpfung dieser Komponenten mittels geeigneter Schnittstellen. Um dies zu gewährleisten, war die Kommunikationsstruktur innerhalb des Verbundes von herausragender Bedeutung.





Gefördert durch:  
 Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie  
aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Entwicklung und Erprobung eines gekoppelten  
Eisvorhersage- und Routenoptimierungssystems

Förderkennzeichen: 03SX328A

31. März 2015

Hamburgische Schiffbau-  
Versuchsanstalt GmbH

Nils Reimer

## 1.3 Voraussetzungen und Stand der Technik

Der Verbund des Vorhabens setzte sich aus sechs Firmen und Institutionen unter Koordination der HSVA zusammen:

- Alfred Wegner Institut für Polar und Meeresforschung (AWI)
- Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH)
- FastOpt GmbH
- Hamburgische Schiffbau-Versuchsanstalt GmbH (HSVA)
- O.A.Sys GmbH
- Universität Hamburg, Institut für Meereskunde, Institut für Meteorologie
- Universität Bremen, Institut für Umweltphysik

## 1.4 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Verbundvorhaben IRO-2, das am 01.10.2011 mit einer Laufzeit von 3 Jahren startete, gliederte sich in sechs Arbeitspakete (AP). Jedes dieser Arbeitspakete wurde von einem Vertreter eines Verbundpartners geleitet.

- AP1: Verbesserung der Eisvorhersage durch verfeinerte Modellierung der meteorologischen und ozeanographischen Antriebsdaten
- AP2: Entwicklung eines Eisvorhersagesystems durch Verbesserung vorhandener Modelle und Integration von Fernerkundungsdaten
- AP3: Entwicklung eines Navigationsmodells für unterschiedliche Schiffe und Eisbedingungen sowie ECDIS-Präsentation relevanter Eisparameter
- AP4: Validierung der Komponenten des ozeanographischen und meteorologischen Vorhersagesystems und Integration der Module
- AP5: Integration des numerischen Navigationsmodells und Validierung des satellitengestützten operationellen Eisvorhersage- und Navigationsmodells
- AP6: Erprobung und Betrieb eines gekoppelten operationellen Eisvorhersage- und Navigationssystems für ECDIS-konforme Darstellung



Gefördert durch:  
  
Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie  
aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

## Entwicklung und Erprobung eines gekoppelten Eisvorhersage- und Routenoptimierungssystems

Förderkennzeichen: 03SX328A

31. März 2015

Hamburgische Schiffbau-  
Versuchsanstalt GmbH

Nils Reimer

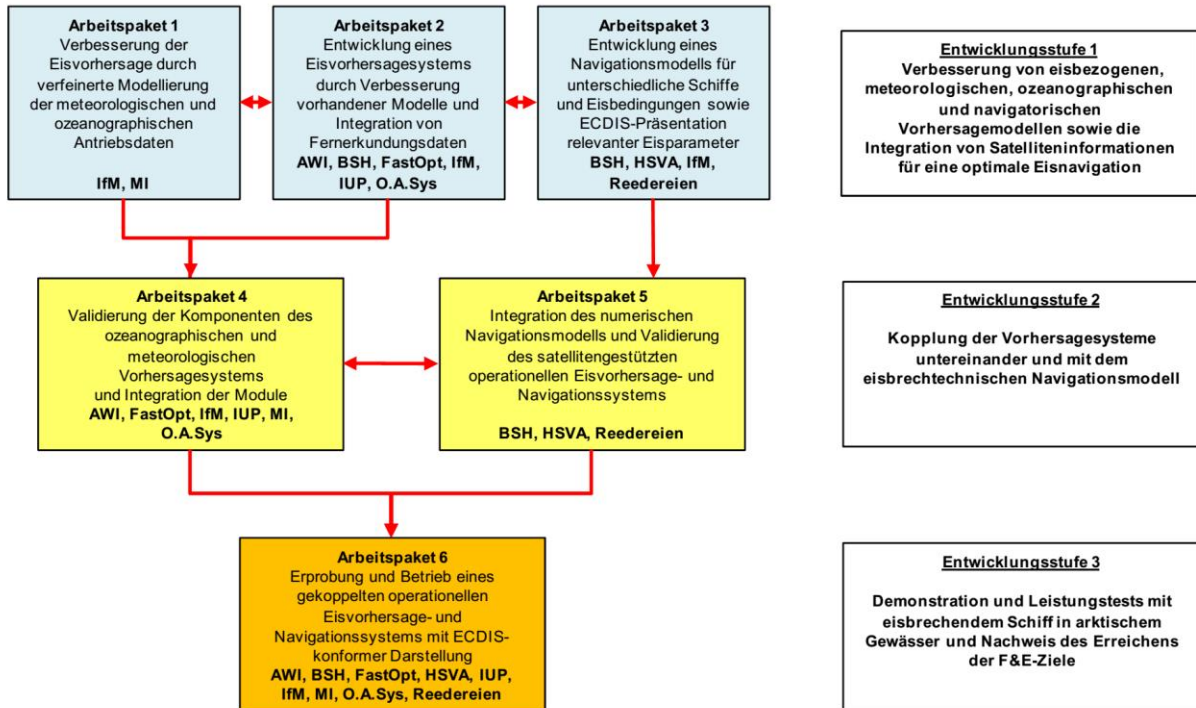


Abbildung 3 Zusammenwirken der Arbeitspakete [1]

Das Vorhaben gliedert sich in drei Entwicklungsstufen:

- Die Verbesserung der Vorhersagemodelle und Prognosen der Schiffsgeschwindigkeit im Eis
- die Kopplung der Vorhersagesysteme untereinander sowie mit der Routenoptimierung
- die Planung und Durchführung einer Erprobungsfahrt mit einem eisbrechenden Schiff

Am Ende jeder Entwicklungsstufe wurde ein Meilenstein definiert, an dem das Erreichen des jeweiligen Zwischenziels überprüft wurde und im Falle eines Nichterreichens eine Anpassung des Ablaufplans vorgesehen wäre (Abbildung 4).

Da alle Zwischenziele erreicht wurden waren diese Anpassungen allerdings nicht erforderlich. Ein Beta-Test wie im Leitantrag erwähnt konnte nicht durchgeführt werden, da keine deutschen Reedereien in dem Vorhersagegebiet, östlich Spitzbergens, operieren.

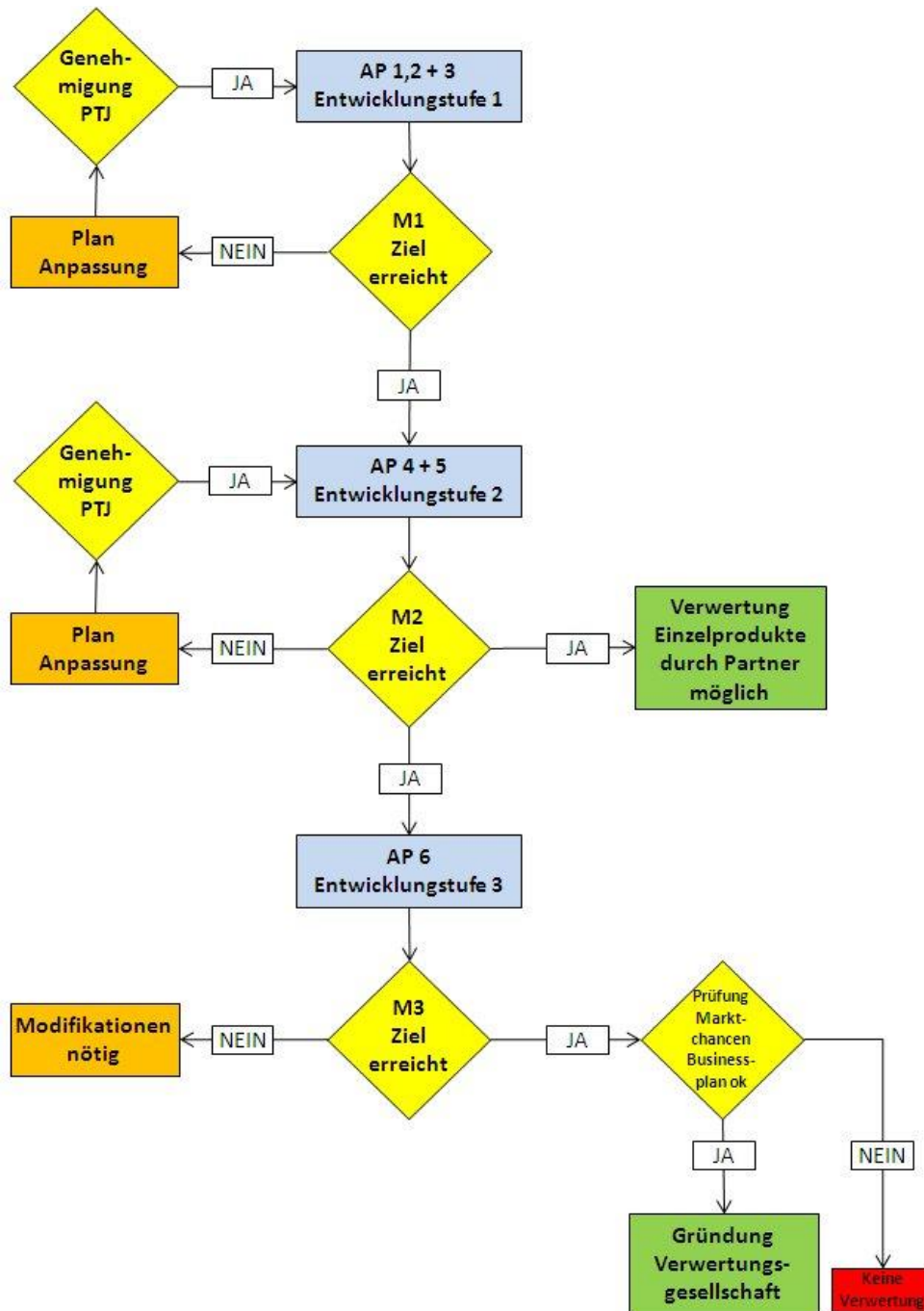


Abbildung 4 Ablaufplan des Vorhabens, Überprüfung des Erreichens der Ziele [1]



Gefördert durch:  
 Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie  
aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Entwicklung und Erprobung eines gekoppelten  
Eisvorhersage- und Routenoptimierungssystems

Förderkennzeichen: 03SX328A

31. März 2015

Hamburgische Schiffbau-  
Versuchsanstalt GmbH

Nils Reimer

Die Erprobungsfahrt mit dem norwegischen Forschungseisbrecher Lance wurde wie geplant im Zeitraum 14. bis 30. März 2014 durchgeführt. Ein Vertrag mit dem Norsk Polar Institut wurde abgeschlossen. Start und Ende der Messfahrt war Longyearbyen auf Spitzbergen was zu einer Verlängerung der Testperiode von zwei Tagen gegenüber dem Starthafen Tromsø führte. Auf der Testfahrt konnte sowohl die Eisvorhersage als auch die Routenoptimierung validiert werden. Ergebnisse begleitender Untersuchungen, die aus anderen Projekten finanziert wurden, ergänzten die Validierung und werden zur Bewertung der Erprobungsfahrt herangezogen werden.

Die Erprobungsfahrt war sehr erfolgreich zeigte jedoch auch, dass weitere Forschung nötig ist. Dies gilt besonders bezüglich Fernaufklärung und Eisvorhersage. Es fehlen dort Informationen über die wichtigen Parameter a) Presseisrückenfrequenz und -mächtigkeit, b) Eisdruck sowie c) Rinnen. Die Güte der Parameter Eisdicke und Eiskonzentration gilt es zu verbessern.

Einzelheiten zu den wissenschaftlichen Arbeiten sind den weiteren Kapiteln dieses Berichts zu entnehmen.

Alle Projektpartner erklären, dass sie die Ziele ihrer Arbeitspakete bereits erreicht haben. Es wurde daher übereinstimmend bestätigt, dass am Projektende die Entwicklung des Systems abgeschlossen ist.

Die Verbundpartner sind übereinstimmend der Meinung, dass derzeit auf die Gründung einer Verwertungsgesellschaft verzichtet werden muss, da

1. das System sich noch nicht in einem marktreifen Zustand befindet
2. aus wirtschaftlichen Gründen sich die überwiegenden Operationen in arktischen Gebieten auf die eisfreie Sommerperiode beschränken

Um die Entwicklung des Prototyps für das Routenoptimierungssystem den Anforderungen aus der Schifffahrt und Meerestechnik anzupassen, wurde ein wissenschaftlich-technischer Beirat (TWB) bestehend aus Vertretern der Branche gegründet, der das Projekt aus professioneller Sicht begleitete.

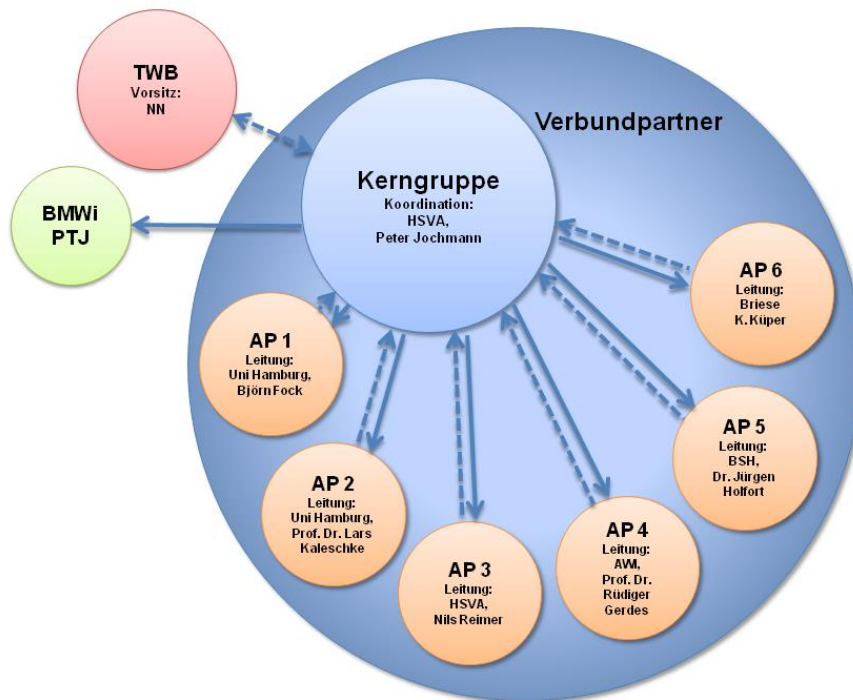


Abbildung 5 Aufbau des Verbundes und TWB [1]

Die Mitglieder des Verbundes tauschten sich halbjährlich auf Treffen über den Stand der einzelnen Arbeitsschritte aus. Darüber hinaus fand ebenfalls zweimal im Jahr ein Treffen mit den Mitgliedern des TWB statt auf denen Zwischenergebnisse präsentiert und anschließend in der Runde diskutiert wurden.

Um das System weiterhin auf die Bedürfnisse des nautischen Personals an Bord der Schiffe auszurichten, wurde ein Fragebogen entwickelt der im ersten Jahr des Vorhabens über verschiedene Reedereien und den Verband Deutscher Reeder an nautische Offiziere von Schiffen in Eisfahrt verteilt wurde. Der Fragebogen enthielt Fragen zum Anforderungsprofil des geplanten Systems. Aus den über 40 Rückläufern konnten wichtige Informationen zu den Anforderungen an den Vorhersagehorizont, die Aktualisierungsrate und gewünschte Darstellungsweise gewonnen werden.



Gefördert durch:  
Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie  
aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Entwicklung und Erprobung eines gekoppelten  
Eisvorhersage- und Routenoptimierungssystems

Förderkennzeichen: 03SX328A

31. März 2015

Hamburgische Schiffbau-  
Versuchsanstalt GmbH

Nils Reimer

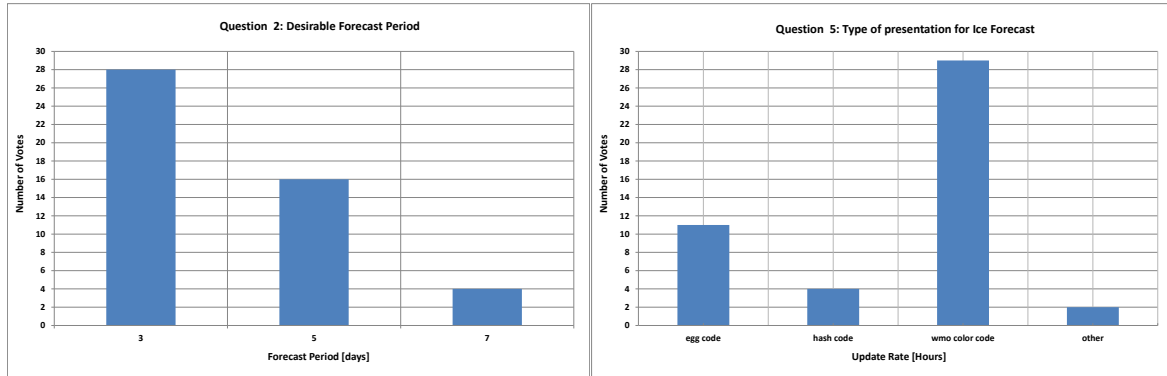


Abbildung 6 Auszug aus den Ergebnissen der Befragung nautischer Offiziere [2]

## 1.5 Wissenschaftlicher und technischer Stand an den angeknüpft wurde

Die Güte der Eisvorhersage ist im hohen Maße von der Verfügbarkeit und der Zuverlässigkeit der Beobachtungsdaten mittels Fernerkundung abhängig. Während die Güte der Algorithmen zur Bestimmung der Eiskonzentration aus Satellitendaten relativ gut bekannt ist, befinden sich die Eisdickenprodukte teilweise noch in der Startphase. Für die Nutzung von Fernerkundungsbeobachtungen standen im Vorhaben Daten der Satellitenmissionen AMSR<sup>1</sup> und SMOS<sup>2</sup> zur Verfügung.

Es gibt eine Vielzahl von numerischen Modellen der Atmosphäre („Wettermodelle“), die eine Vorhersage des atmosphärischen Zustands über einen Zeitraum von maximal etwa 10 Tagen ermöglichen, aber auch Modelle, die für Klimauntersuchungen über Jahrzehnte bis Jahrhunderte eingesetzt werden. Für den Ozean existieren ebenfalls eine Reihe verschiedener Modelle, die in der Vorhersage für nur einige Tage, in der Klimaforschung jedoch auf Zeitskalen von vielen Jahren bis Jahrhunderten eingesetzt werden können. Nach etwa drei Tagen nimmt der Vorhersage-Skill der Atmosphäre deutlich ab, während Modellsimulationen des Ozeans eine mögliche Vorhersagbarkeit über einen Zeitraum von bis zu zehn Jahren zeigen. Dies gilt jedoch nur für großräumige Zirkulationsmuster. Für oberflächennahe Strömungen hängt die Vorhersagbarkeit von der Atmosphäre ab und beträgt daher ebenfalls nur wenige Tage. Davon ausgenommen sind gut vorhersagbare periodische Störungen wie die Gezeiten.

<sup>1</sup> AMSR Advanced Microwave Scanning Radiometer 2

<sup>2</sup> SMOS Soil Moisture and Ocean Salinity Mission





Gefördert durch:  
 Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie  
aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Entwicklung und Erprobung eines gekoppelten  
Eisvorhersage- und Routenoptimierungssystems

Förderkennzeichen: 03SX328A

31. März 2015

Hamburgische Schiffbau-  
Versuchsanstalt GmbH

Nils Reimer

Auch für das Meereis existieren viele numerische Modelle, um die Eisbewegung (Dynamik) sowie das Schmelzen und Gefrieren (Thermodynamik) zu berechnen. Die für das Meereis relevante Zeitskala liegt dabei zwischen der des Ozeans und der Atmosphäre. Um das Klimasystem zu untersuchen, ist es notwendig, Wechselwirkungsprozesse zwischen Ozean, Meereis und Atmosphäre numerisch zu erfassen. Dies wird möglich durch eine Kopplung der einzelnen Modellkomponenten. Die damit verbundenen numerischen Herausforderungen sind Gegenstand aktueller wissenschaftlicher Forschung. Erst in den letzten Jahren sind Experimente mit vollständig gekoppelten regionalen Ozean-, Meereis- und Atmosphärenmodellen im Rahmen der Klimaforschung durchgeführt worden (Mikolajewicz et al. 2005, Döscher et al. 2009). Die Ergebnisse mit diesen gekoppelten Modellen zeigen das Vorhandensein interner Variabilität, die nur durch die vollständige Kopplung der Komponenten erfasst wird. Die räumliche Auflösung des von Döscher et al. (2009) verwendeten gekoppelten Modells beträgt 0,5 Grad, d.h. etwa 50 km. Für die geplante Anwendung einer regionalen Eisvorhersage für die Schifffahrt ist dies noch zu grob.

Für die Prognose der Eisbrechfähigkeit und damit der erreichbaren Geschwindigkeit von Schiffen im Eis stehen derzeit noch keine zuverlässigen numerischen Methoden zur Verfügung. Prognosen werden daher in der Regel aus physikalischen Modellversuchen gewonnen. Im Eistanz der HSVA werden solche Versuche in künstlich hergestelltem Modelleis zur Entwicklung im Schiffsentwurf für Kunden aus der maritimen Industrie sowie zu Forschungszwecken durchgeführt. Hierzu werden Modelle unterschiedlicher Rumpfformen durch ebenes, gebrochenes oder aufgepresstes Eis geschleppt und die wirkenden Kräfte ermittelt. Die Schiffsmodelle sind hierfür mit einem eigenen Antrieb ausgerüstet und mit Kraftmessdosen instrumentiert. Ein angeschlossener Modelpropeller wird über eine Welle angetrieben und kann bei unterschiedlichen Drehzahlen betrieben werden. Während der Fahrt wird das Drehmoment an der Antriebswelle gemessen, so dass die erforderliche Leistung für den Propulsionspunkt bei unterschiedlicher Kombination aus Eisparametern und Geschwindigkeit bestimmt werden kann. Aus den Ergebnissen erhält man somit eine schiffsspezifische Eisbrechfähigkeit. Aus den zahlreichen Eisversuchen mit Modellen unterschiedlicher Größe und Form, die in der Vergangenheit an der HSVA durchgeführt wurden kann mittels semi-empirischer Verfahren die Eisbrechfähigkeit nicht getesteter Schiffe prognostiziert werden. Diese Prognosen fließen dann in die Transitsimulationen und die Routenoptimierung ein. Für gebrochenes, und deformiertes Eis sind diese Methoden noch wenig entwickelt,



Gefördert durch:  
 Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie  
aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Entwicklung und Erprobung eines gekoppelten  
Eisvorhersage- und Routenoptimierungssystems

Förderkennzeichen: 03SX328A

31. März 2015

Hamburgische Schiffbau-  
Versuchsanstalt GmbH

Nils Reimer

so dass eine Modellversuchskampagne innerhalb des Vorhabens zum Ausbau vorhandener Prognoseverfahren diene [3].

Für die Darstellung von Eisinformatoren an Bord von Schiffen in elektronischer Form existieren internationale Standards, die von den Eisdiensten entwickelt wurden. Da die Anforderungen an die elektronischen Navigationshilfen ständig steigen und sich die technischen Möglichkeiten zur Datenübertragung gleichzeitig verbessern, müssen diese Standards in unregelmäßigen Abständen überarbeitet werden. Dies erfordert dann ein Umrüsten der ECDIS Einheiten durch die Hersteller. Zur Zeit des Vorhabens war der S57 Standard für Eioobjekte in elektronischen Seekarten aktuell. Ein neuer Standard (S100) befand sich zu diesem Zeitpunkt bereits in der späten Entwicklungsphase, war aber von den Eisdiensten untereinander noch nicht endgültig abgestimmt und daher von den Herstellern auch noch nicht implementiert worden.

## **1.6 Zusammenarbeit mit anderen Stellen**

Für die Erprobung der Darstellung von Eisinformatoren im WMO Color Code und gleichzeitige Überlagerung der Routendarstellung auf ENC Geräten an Bord musste die Ausgaben der regionalen Eisvorhersage und des Routenoptimierungsmoduls an gängige Standards und Formate angepasst werden. Für die Darstellung von Eisinformatoren in der elektronischen Seekarte ist zum Zeitpunkt des Vorhabens der sogenannte S57 Standard aktuell. Der, noch in der Entwicklung befindliche S100 Standard für Eisobjekte konnte von den Herstellern im Zeitraum des Vorhabens noch nicht integriert werden und wurde daher nicht genutzt. Für die Routenausgabe wurde das gängige rt3 Format verwendet, das sich in elektronischen Seekarten als Überlagerung in Form von Wegepunkten darstellen lässt. Für die Erprobung der Kompatibilität der Ausgabeformate wurde von dem TWB Mitglied Firma Transas eine elektronische Seekarten- und Navigationssoftware kostenlos bereitgestellt.

Das IRO2-Projekt und insbesondere die Erprobungsfahrt mit R/V Lance war Nukleus für ein umfangreiches Feldexperiment mit weiterer nationaler und internationaler Beteiligung und Ko-Finanzierung:

European Space Agency (SMOSIce Projekt): Ko-Finanzierung und Teilnahme am Flugmessprogramm mit dem AWI-Forschungsflugzeug Polar 5 und Hubschrauber zur Validation durch CryoSat-2 und SMOS bestimmte Eisdicken.





Gefördert durch:  
 Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie  
aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Entwicklung und Erprobung eines gekoppelten  
Eisvorhersage- und Routenoptimierungssystems

Förderkennzeichen: 03SX328A

31. März 2015

Hamburgische Schiffbau-  
Versuchsanstalt GmbH

Nils Reimer

Nors Polarinstitut (SMOSIce Projekt): Kofinanzierung und Durchführung von Hubschrauber-Messungen mit einem EM-Bird zur Bestimmung der Eisdicke. R/V Lance gechartert durch Universität Hamburg.

Technical University of Denmark (DTU) (SMOSIce Projekt): Kofinanzierung und Durchführung von Radiometer-Messungen zur SMOS-Validation (EMIRAD2 L-Band Radiometer auf Polar 5)

OceanWaves GmbH: Installation des WaMoS II – Wave Monitoring System, gemietet durch Universität Hamburg. Daten im Eisrandbereich dienen der Firma für weitere Entwicklungen und Validation.

DLR: Kontingent von 80 TerraSAR-X Bildern für PI Lars Kaleschke, Universität Hamburg

DFG (Exzellenzcluster CliSAP, Universität Hamburg): Beschaffung und Ausbringen von Eisdrift-Bojen der Firma MetOcean, Canada.

## **2. Eingehende Darstellung des Vorhabens**

### **2.1 Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse im Einzelnen**

#### **2.1.1 AP2 Satellitenfernerkundung und Modellantrieb**

Das arktisweite (Kapitel 2.1.2) und das regionale Vorhersagemodell (Kapitel 2.1.3) benötigen zur Initialisierung möglichst aktuelle Eisinformationen aus Satellitendaten. Die Verbesserung und Operationalisierung von Algorithmen zur Eisfernerkundung war daher Ziel der Arbeiten des Teilprojektes der Universität Hamburg. Kurz vor und während des IRO2-Projektes wurden neue und neuartige Satellitensensoren in Betrieb genommen: das Advanced Microwave Scanning Radiometer 2 (AMSR-2) der japanischen Weltraumorganisation JAXA bietet eine hohe räumliche Auflösung zur Bestimmung der Eiskonzentration [4]. Der Sensor SMOS der europäischen Weltraumagentur ESA ermöglichte erstmals die Messung der Eisdicke mit täglicher Abdeckung der Arktis. Zudem wurden Daten des deutschen Satellitensensors TerraSAR-X (TSX) in einem neuen Betriebsmodus (6-Beam Wide-Swath-Mode) genutzt. Als Ausweichlösung für den Fall eines Satellitenausfalls wurden SSMIS-Daten in eine operationelle Prozesskette mit eingebunden [5]. Die Daten der neuen und existierenden Sensoren wurden



Gefördert durch:  
 Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie  
aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Entwicklung und Erprobung eines gekoppelten  
Eisvorhersage- und Routenoptimierungssystems

Förderkennzeichen: 03SX328A

31. März 2015

Hamburgische Schiffbau-  
Versuchsanstalt GmbH

Nils Reimer

genutzt, um eine Reihe von für die Schifffahrt relevanten Eisparametern abzuleiten:

- Eiskonzentrationen
- Eisdicke
- Rinnenaufreten und -Orientierung
- Eisbewegung, Eiskompression

Zur Validation der Satelliten-Algorithmen wurden während der Erprobungsfahrt entsprechende Eisdickenmessungen und Eisbeobachtungen durchgeführt. Zudem wurde vor der Erprobungsfahrt ein Array autonomer Driftbojen per Flugzeug auf dem Eis ausgebracht (Abbildung 7). Die Erprobungsfahrt wurde mit einem umfangreichen Flugzeugexperiment kombiniert, bei dem weitere Messdaten gewonnen wurden, ergänzt durch Hubschrauberflüge von Bord der Lance.

Ein wichtiger Aspekt der Assimilation von Beobachtungsdaten zur Initialisierung des Vorhersagesystems ist die Kenntnis von Unsicherheiten für die zu assimilierenden Messgrößen (siehe Kapitel 2.1.2). Im Rahmen von IRO-2 wurde daher insbesondere auch die Fehlerabschätzung verbessert.

Arbeiten zur Detektion und Bestimmung der Orientierung von Rinnen sowie die Erstellung einer Rinnenklimatologie [5,6,7], zur Verbesserung von Verfahren zur Bestimmung der Eiskonzentration und zur Eisdickenbestimmung mit SMOS [8] wurden mit mehreren Publikationen in begutachteten Fachzeitschriften und den Promotionen der IRO2-Projektmitarbeiter David Bröhan [9] und Alexander Beitsch [10] erfolgreich abgeschlossen.

Die neu implementierten Prozessketten und die Bereitstellung von Satellitendaten für das Vorhersagesystem liefen bis auf eine Ausnahme problemlos. Eine kurzzeitige Störung des operationellen Betriebes wurde durch Netzwerk- und Rechnerausfälle verursacht. Für einen zukünftigen operationellen Betrieb mit hoher Ausfallsicherheit wäre die Installation auf einem virtuellen Rechner in einem mit redundanten Systemen ausgestatteten Rechenzentrum zu empfehlen.

Die Bestellung und Aufnahme von rund 80 TSX-Bildern im neuen 6-Beam Wide-Swath Mode war erfolgreich. Es gab bis auf einen Fall keine konkurrierenden Bestellungen, so dass das Untersuchungsgebiet während der Erprobungsfahrt fast kontinuierlich zweimal täglich abgedeckt wurde. Die TSX-Daten sind, wie geplant, nicht in die Vorhersage und Routenoptimierung eingegangen und stehen für weitere Analysen als unabhängige Validationsdaten zur Verfügung. Eine vorläufige Auswertung der Eisdrift abgeleitet aus TSX-Bildpaaren zeigt, das Potenzial dieses Datensatzes. In Abbildung 7 ist eine Region mit Festeis sowie

eine südlich gelegene Scherzone zu erkennen. Die Bewegung der innerhalb des dargestellten Bildüberlapps gelegenen Driftbojen ist konsistent mit der Eisdrift, die aus den etwa 14 Stunden zeitversetzten TSX-Bildern abgeleitet wurde.

Während der Erprobungsfahrt und der begleitenden Messflüge wurden insgesamt rund 5000 km Eisdickenprofile gewonnen. Eine Übersicht der Messprofile ist in Abbildung 8 zu sehen. In Abbildung 9 ist die Messung der Eisdicke mit dem EM31-System am Bug von Lance über die Fahrtstrecke von 1800 km dargestellt. Eine vorläufige Auswertung zeigt eine Diskrepanz von Schiffs- (EM31) und Hubschraubermessung (HEM). Die EM31-Daten zeigen durchweg eine geringere Eisdicke, als die HEM-Messungen. Eine plausible Hypothese zur Erklärung ist, dass Lance überwiegend in Rinnen und dünnem Eis gefahren ist und der Hubschrauber diese Dünneis-Regionen gemieden hat. Zudem ist in den HEM-Messungen offenes Wasser ausmaskiert. Beide Meß-Systeme haben also einen Bias in unterschiedliche Richtung. Die Einzeldaten sind also nicht repräsentativ für die Region. Für die Validation der mittels SMOS bestimmten Eisdicken sind weitere Analyseschritte in Kombination mit anderen Daten notwendig. Diese umfangreichen Arbeiten waren nicht im IRO2-Projektplan vorgesehen und finden nun im von der ESA finanzierten Verbundprojekt SMOS+ Sea Ice statt.

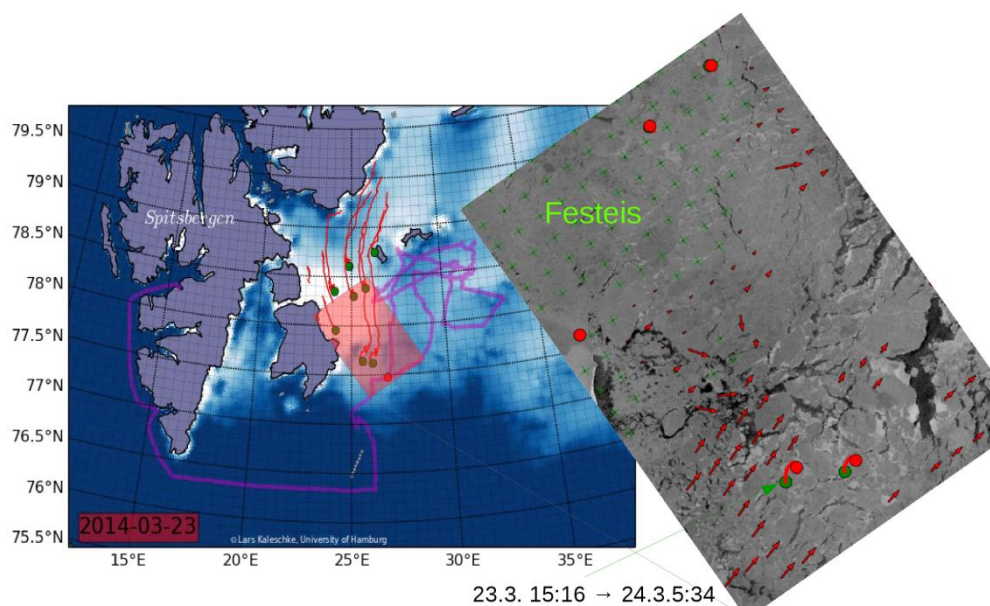


Abbildung 7 IRO-2 Untersuchungsgebiet am 23. März 2014:

Eisvolumen aus SMOS und AMSR2, Eisdriftbojen- und Lance-Trajektorien (links). Die Driftvektoren (rechts) wurden aus zwei TerraSAR-X Bildern vom 23.3. 15:16 und 24.3. 05:34 mittels der Methode maximaler Kreuzkorrelation abgeleitet. Die grünen bzw. roten Punkte zeigen die Position der Bojen zum Start- bzw. Endzeitpunkt an. Die grünen Kreuze sind Regionen ohne signifikante Bewegung (Festeis).



Gefördert durch:  
 Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie  
aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

## Entwicklung und Erprobung eines gekoppelten Eisvorhersage- und Routenoptimierungssystems

Förderkennzeichen: 03SX328A

31. März 2015

Hamburgische Schiffbau-  
Versuchsanstalt GmbH

Nils Reimer

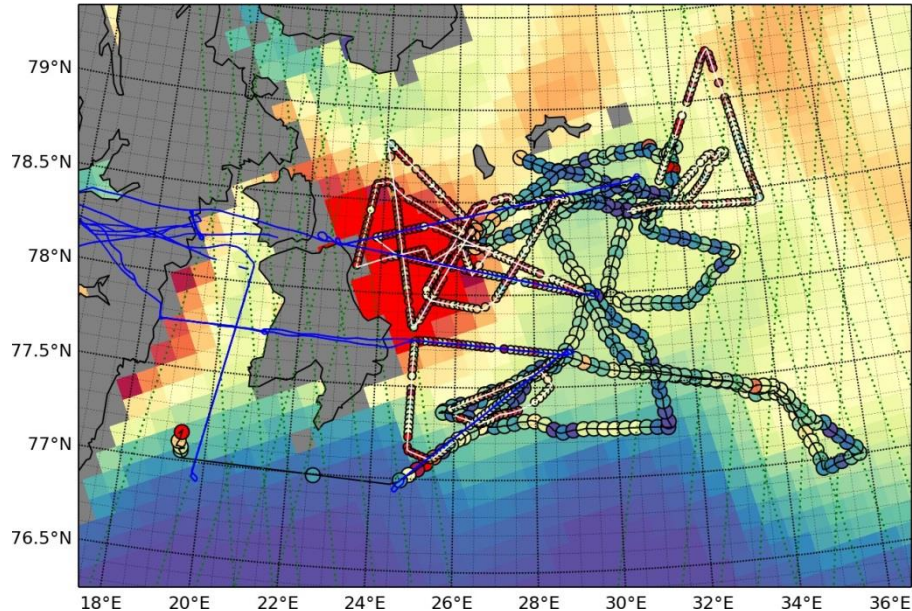


Abbildung 8 Daten-Übersicht der Feldkampagne 18-26 März 2014:

SMOS Eisdicke (Hintergrund, 0-1 Meter farbkodierter Mittelwert), R/V Lance EM-31 (schwarze Linie), HEM (weiße Linie), Polar 5 L-Band Radiometer EMIRAD2/Schnee-Radar (blaue Linie), CryoSat2 (gepunktete grüne Linien).

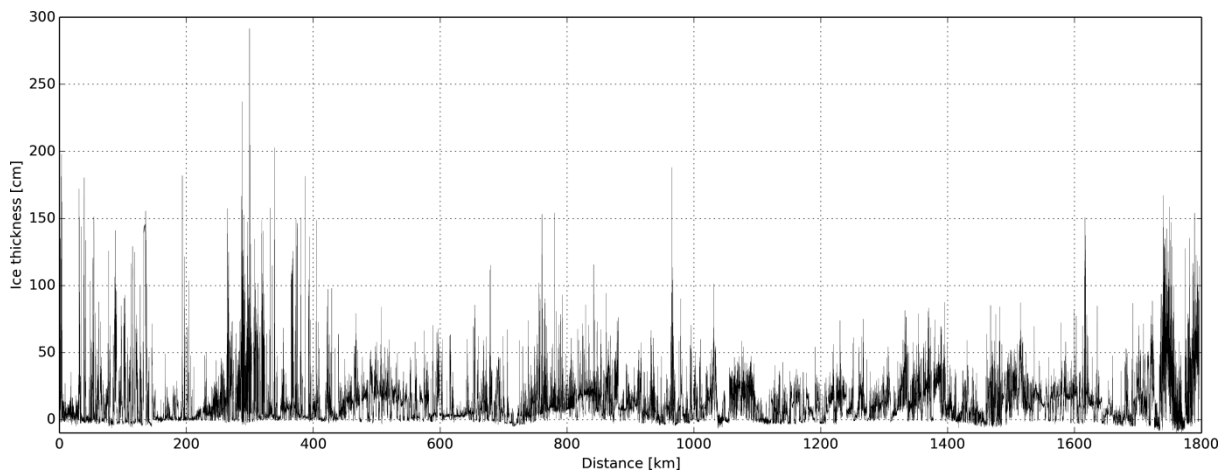


Abbildung 9 Schiffsgestützte EM-31 Messungen gemittelt über 30 Meter.

### Schneeauflage auf Meereis

#### Implementation des grundlegenden Algorithmus

Der Algorithmus von Markus und Cavalieri [11] kann aus Satellitendaten die Dicke der Schneeauflage auf einjährigem Meereis bestimmen. Benutzt werden





Gefördert durch:  
 Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie  
aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Entwicklung und Erprobung eines gekoppelten  
Eisvorhersage- und Routenoptimierungssystems

Förderkennzeichen: 03SX328A

31. März 2015

Hamburgische Schiffbau-  
Versuchsanstalt GmbH

Nils Reimer

dazu die Strahlungstemperaturen, die bei 18 GHz und bei 37 GHz in vertikaler Polarisation gemessen werden. Dieser Basisalgorithmus wurde für drei verschiedene Satelliteninstrumente implementiert:

- AMSR-E, das ursprünglich vorgesehene Instrument, das von 2002 bis Oktober 2011 Daten lieferte, mit höherer räumlicher Auflösung als vergleichbare Instrumente;
- AMSR2, mit derselben hohen Auflösung wie AMSR-E, und ab August 2012 dessen Nachfolgeinstrument;
- SSMIS (Special Sensor Microwave Imager/Sounder), ein operationelles Instrument auf mehreren U.S.-amerikanischen Wettersatelliten mit deutlich gröberer Auflösung, zum Überbrücken der Lücke zwischen AMSR-E und AMSR2, sowie als zusätzliches Backup, mit Daten ab Dezember 2005.

Der Algorithmus wurde in die Prozesskette integriert, die täglich aus den neuesten Satellitendaten die Meereisbedeckung aller Ozeane und Meere berechnet, so dass nun zusätzlich auch die Schneedicke auf einjährigem Meereis täglich berechnet werden kann.

Ausmaskieren von „beeinflusstem“ (z.B. mehrjährigem) Eis

Der Basisalgorithmus kann nur über einjährigem Meereis und trockenem Schnee angewandt werden, außerdem führt Schmelzen und Wiedergefrieren der Schneeoberfläche dazu, dass der Algorithmus falsche, zu große Schneedicken berechnet.

Das Ausmaskieren von mehrjährigem Eis wurde zunächst mit Hilfe von Satellitenradar (Scatterometer ASCAT) gemacht – unebenes mehrjähriges Eis hat einen höheren Radarrückstreuquerschnitt als ebenes einjähriges Eis. Allerdings stehen die ASCAT-Daten des Radarrückstreuquerschnitts nicht immer in near-real-time zur Verfügung – während des Projektes wurden sie über das Ifremer (Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer) bezogen, denn die Prozessierung der Rohdaten von EUMETSAT ist aufwändig. Daher wurde eine andere Methode zum Maskieren von mehrjährigem Eis getestet: Das Verhältnis der Strahlungstemperaturen bei 89 und 19 GHz, V-Polarisation (von AMSR2) nutzt die unterschiedliche Frequenzabhängigkeit der Emissivität von ein- und mehrjährigem Eis sowie offenem Wasser aus, es wird auch verwendet, um glattes neues Eis zu erkennen. Es zeigte sich allerdings, dass die Abhängigkeit



Gefördert durch:  
 Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie  
aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Entwicklung und Erprobung eines gekoppelten  
Eisvorhersage- und Routenoptimierungssystems

Förderkennzeichen: 03SX328A

31. März 2015

Hamburgische Schiffbau-  
Versuchsanstalt GmbH

Nils Reimer

der Strahlungstemperatur bei 89 GHz von der Atmosphäre (Wasserdampf, Wolken, Niederschlag) und vermutlich von der Schneeeauflage selbst das Ergebnis stark beeinflusst und eine einfache Erkennung von mehrjährigem Eis nicht möglich ist. Als sinnvoller hat sich erwiesen, die jeweils neuesten Scatterometer-Daten, die maximal 1 bis 2 Wochen alt sind, zu verwenden. Als passender Schwellwert hat sich ein Radarrückstreuquerschnitt von -13 dB erwiesen.

Um Schmelzereignisse besser zu erkennen, wurden Daten der Lufttemperatur aus der operationellen Analyse des ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) hinzugenommen und die gemeinsame Visualisierung von Schneedicke, Standardabweichung der Schneedicke in den vorangegangenen 5 Tagen, Radarrückstreuquerschnitt vom Scatterometer ASCAT, und bodennahe Lufttemperatur implementiert (<http://www.iup.uni-bremen.de:8084/snow/>). Damit wurden Fallstudien durchgeführt, um das Verhalten des Schneedickenalgorithmus und der Radarrückstreuung im Jahresgang zu analysieren. Ergebnisse der Fallstudien:

- Antauen der Oberfläche (nasser Schnee) führt sofort (innerhalb eines Tages) zu einer starken Verringerung der berechneten Schneedicke oder gar zu negativer „Schneedicke“. Das ist konsistent mit der Physik, da die dielektrischen Eigenschaften von nassem Schnee so sind, dass im Wesentlichen nur noch die Oberfläche Mikrowellen emittiert, man quasi die Schneeschicht „nicht mehr sehen kann“.
- Wiedergefrieren lässt die vermeintliche Schneedicke sprunghaft auf unrealistische Werte nahe der Sättigung des Algorithmus ansteigen (50 cm).
- Um angetaute Gebiete zu erkennen und sofort auszuschließen, sind die ECMWF-Temperaturdaten am besten geeignet.

#### Vergleich mit gemessenen Schneedicken auf Meereis

Da eine Abschätzung des Fehlers der Fernerkundungsdaten für die Assimilation essentiell ist, wurde die berechnete Schneedicke verglichen mit Schneedickendaten der IceBridge-Flugkampagnen der NASA. Die Flüge fanden statt seit 2009, jeweils im März/April, im Bereich Grönland-Kanadische Arktis-Alaska. Es wurden 11 Flüge aus den Jahren 2009 bis 2011 ausgewählt, und die gemessenen Schneedickendaten mit den von uns aus AMSR-E-Daten berechneten Schneedicken („Satelliten-Retrieval“) kolokiert und verglichen, dabei wurden bewusst keine Gebiete ausmaskiert. Die wichtigsten Ergebnisse:



Gefördert durch:  
 Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie  
aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Entwicklung und Erprobung eines gekoppelten  
Eisvorhersage- und Routenoptimierungssystems

Förderkennzeichen: 03SX328A

31. März 2015

Hamburgische Schiffbau-  
Versuchsanstalt GmbH

Nils Reimer

- über einjährigem Eis (IceBridge-Schneedicken zwischen 5 und 25 cm):
  - die Wurzel der quadratischen Abweichung – „rms-Differenz“ – zwischen den Daten über einjährigem Eis: 4 bis 8 cm,
  - mittlere Differenz – „Bias“ – (Satelliten-Retrieval minus IceBridge): 1 bis 5 cm.
- über mehrjährigem Eis (IceBridge-Schneedicken zwischen 5 und 80 cm):
  - rms-Differenz: ca. 25 cm,
  - Bias: ca. 20 cm, d.h. das Satelliten-Retrieval überschätzt die Schneedicke im Mittel stark.

Die Ergebnisse über mehrjährigem Eis entsprechen den Erwartungen, da der Schneedickenalgorithmus dort unzuverlässig ist. Die rms-Differenz über einjährigem Eis lässt sich dann als untere Schranke des Fehlers des Satelliten-Retrievals benutzen, der für die Assimilation benötigt wird.

#### Abschätzung des Fehlers für Assimilation

Die Abschätzung des Fehlers der Schneedickendaten, bisher nur aus der Standardabweichung der vorangegangenen Tage und einem konstanten Wert aus dem Vergleich mit Messdaten der IceBridge-Kampagne bestimmt, wurde dann weiter verbessert: Aus den Gleichungen des Retrievalalgorithmus wurde abgeleitet, wie aus den Fehlern der Inputparameter der Fehler der abgeleiteten Schneedicke resultiert (Fehlerfortpflanzung). Inputparameter sind neben den vom Satelliten direkt gemessenen Strahlungstemperaturen (Radianzen) auch die verschiedenen Koeffizienten des Retrievalalgorithmus selbst. Die Berechnung dieses Fehlers wurde in die Prozesskette implementiert. Der schließlich für die Datenassimilation verwendete Fehler ist eine Kombination aus der Standardabweichung der vorangegangenen 5 Tage und dem neu implementierten Fehler aus den Inputdaten: Wo die Standardabweichung groß ist, also die abgeleitete Schneedicke stark schwankt (typischerweise wegen Schmelzens und Wiedergefrierens), ist das Schneedickenretrieval unsicher; wo die Standardabweichung sehr klein ist oder verschwindet, also die abgeleitete Schneedicke konstant ist, ist der immer vorhandene Fehler aus den Inputdaten maßgeblich.

#### Datenassimilation für Erprobungsfahrt

Die Erprobungsfahrt mit dem Norwegischen Forschungsschiff Lance fand Ende März 2014 östlich von Spitzbergen statt. Dazu mussten die Daten in eine für das



Gefördert durch:  
 Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie  
aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Entwicklung und Erprobung eines gekoppelten  
Eisvorhersage- und Routenoptimierungssystems

Förderkennzeichen: 03SX328A

31. März 2015

Hamburgische Schiffbau-  
Versuchsanstalt GmbH

Nils Reimer

Datenassimilationssystem geeignete Projektion umgerechnet und die tägliche automatische Datenübermittlung eingerichtet werden. Für die Assimilation musste außerdem noch angepasst werden, wie fehlende Daten dargestellt werden und in welcher Art raues (mehrjähriges) Eis ausmaskiert werden sollte. Letzteres geschah dadurch, dass die Unsicherheit auf den Maximalwert gesetzt wurde. Da bei der Assimilation die Gewichtung der eingehenden Daten im Wesentlichen umgekehrt proportional zum Quadrat der Unsicherheit ist, bekommt raues Eis quasi verschwindende Gewichtung und wird nicht weiter berücksichtigt. Außerdem erklärte sich das Ifremer (Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer) bereit, für den Zeitraum der eigentlichen Fahrt die Scatterometerdaten für die Erkennung rauhen Eises in Fast-Echtzeit bereitzustellen. Nach Behebung einer kleinen Datenpanne am Beginn der Erprobungsfahrt hat die Übergabe und Assimilation der Schneedickendaten reibungslos funktioniert.

#### Vergleich mit Schneekorngrößen aus optischer Fernerkundung

Erstmals wurde ein Vergleich durchgeführt von Schneekorngrößen, die aus Satellitendaten im sichtbaren/infraroten Licht (Spektroradiometer MODIS) gewonnen werden, mit den Schneedicken aus den Mikrowellendaten. Dazu wurden zunächst gleichzeitige Daten der Monate April bis Juni aus den letzten zehn Jahren von den zuvor identifizierten geeigneten Regionen, Laptewsee, Ostsibirische See und Hudson Bay gesucht. Bedingung für gleichzeitige Schneedicken- und Schneekorngrößendaten sind: (1) eine vorhandene Eisbedeckung des Meeres, (2) Temperaturen überwiegend im Frostbereich mit kurzen Schmelz-Episoden (die das Korngrößenwachstum stark beschleunigen), (3) Sonnenhöhen von mindestens  $15^\circ$  über dem Horizont (um genügend sichtbares Licht zu haben). Die notwendigen Temperaturdaten stammen aus Analysedaten des ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts). Es zeigte sich, dass

- es über der Hudson Bay in den Monaten April bis Juni durchweg zu wolkelig war, so dass es bis auf einzelne Teilregionen (an einzelnen Tagen) praktisch keine Schneekorngrößendaten gab;
- in der Ostsibirischen See das Eis meist zu früh schmolz, noch bevor die Sonne hoch genug über dem Horizont war, und es außerdem zu wolkelig war;
- lediglich für die Laptewsee für den Monat Mai genügend gleichzeitige Daten für eine weitergehende Untersuchung vorhanden waren, und zwar in den Jahren 2004 – 2006 und 2010 – 2013.



Exemplarisch ein Beispiel aus dem Mai 2010: Abbildung 1 zeigt die Schneedicke (aus Mikrowellendaten) und die Schneedicke (aus optischen Daten) am 1. Mai 2010. Die Schneedicke liegt im Bereich von 5 cm bis ca. 20 cm, die Schneekorngröße ist gering, deutlich unter 200  $\mu\text{m}$ . Abbildung 2 zeigt das gleiche Gebiet 10 Tage später, während einer vorübergehenden leichten Tauwetter-Episode südlich von 75° Nord: Die Schneedicke hat leicht abgenommen, die Schneekorngröße ist angewachsen auf deutlich über 200  $\mu\text{m}$ . Nach dem Wiedergefrieren (hier nicht gezeigt) ist die Schneedicke scheinbar stark angewachsen.

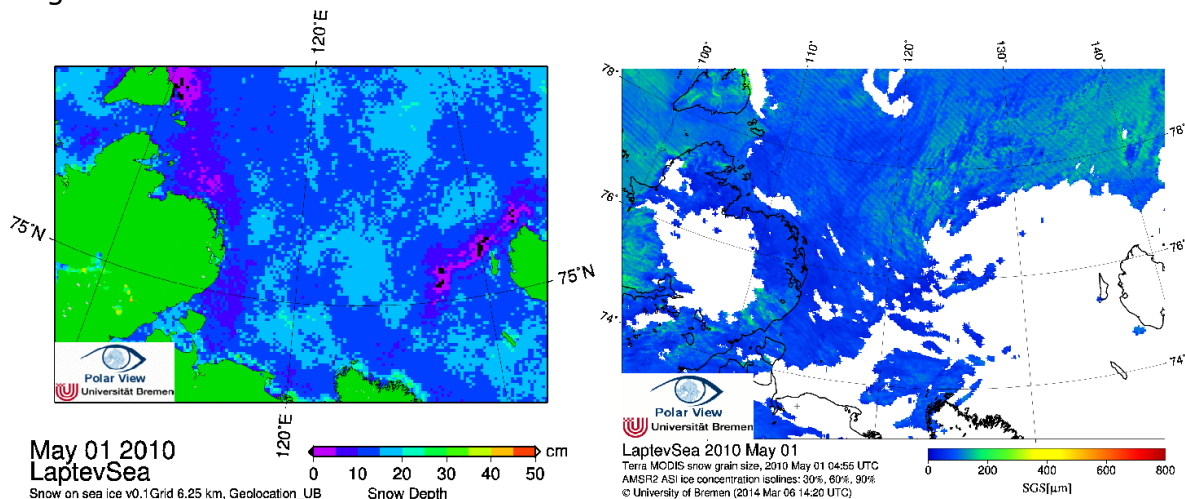


Abbildung 10: Schneedicke (links), Schneekorngröße (rechts), Laptevsee, 1. Mai 2010

Insgesamt zeigt der Vergleich weiterer Daten aus dem o.g. Zeitraum, dass das Signal von Schmelzen und Wiedergefrieren konsistent eine angewachsene Schneekorngröße ist sowie eine stark überschätzte Schneedicke. Plötzliche Verringerung der Schneekorngröße ist oft mit Anwachsen der Schneedicke verbunden, was durch Schneefall verursacht wird. Es gibt aber auch Fälle, in denen die Schneekorngröße sich verringert und die Schneedicke nicht anwächst – das deutet auf den Effekt von Wind hin, der den Schnee verbläst und dabei die Schneekörner zerkleinert. In jedem Fall ist das Hinzuziehen von Temperaturdaten (z.B. ECMWF-Analyse) sinnvoll.

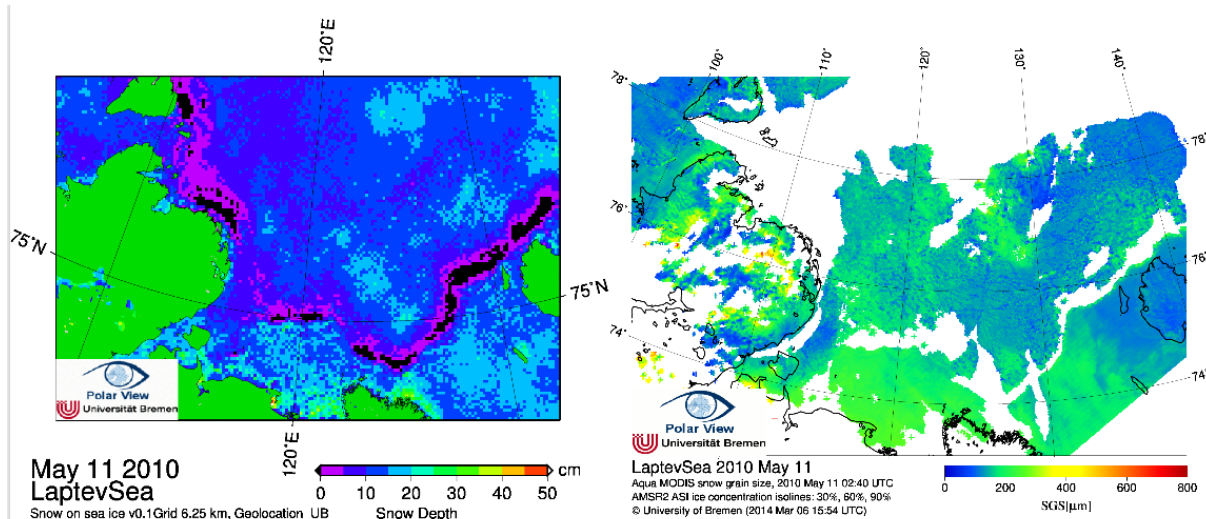


Abbildung 11: Schneedicke (links), Schneekorngröße (rechts), Laptevsee, 11. Mai 2010

### 2.1.2 AP 2 Arktisweite grobskalige Eisvorhersage und Validierung

Ziel dieses Teilprojektes war die Bereitstellung von optimierten Vorhersagen der arktisweiten Eisbedeckung von bis zu 7 Tagen. Diese Vorhersagen sollten als Randbedingungen für das regional begrenzttere, aber räumlich höher auflösende, gekoppelte Ozean-Atmosphäre Vorhersagemodell (Abschnitt 2.1.3) dienen. Dazu wurde in enger Zusammenarbeit der IRO-2 Verbundpartner O.A.Sys, FastOpt und Alfred Wegener Institut (AWI) das variationelle Datenassimilationsschema ICEDAS zur Verbesserung von modellbasierten Echtzeitanalysen und darauf aufbauenden Vorhersagen der arktischen Eisbedeckung entwickelt und betrieben. Das System baut auf dem Meereis-Ozeanmodell NAOSIM (North Atlantic/Arctic Ocean Sea Ice Model) auf.

Für die in IRO-2 verwendete Konfiguration von NAOSIM/ICEDAS wurde ein Modellgebiet vom Nordpol bis zu 54° nördlicher Breite gewählt. Das Gebiet umfasst somit nicht nur die Arktis, sondern auch erhebliche Teile des Nordatlantiks. Dies ermöglicht es, die Arktis ohne Randeffekte zu simulieren. Das Modellgitter wurde dabei so gedreht, dass der Nordpol über dem Äquator liegt. Damit liegt für die Arktis ein nahezu äquidistantes horizontales Gitter vor.

Da bei der numerischen Modellierung des arktischen Ozean/Meereissystems mit NAOSIM einige Ungenauigkeiten verbleiben, sollte eine Verbesserung der Modellanalysen mit Hilfe der Assimilation von Beobachtungsdaten erfolgen, um die Qualität der Eisvorhersagen zu verbessern. Dazu wurden satellitengestützte

Beobachtungsdaten der Meereiskonzentration und Meereisdicke sowie der Schneedicke auf dem Eis (Abschnitt 2.1.1) und zusätzlich auch SST Daten in Echtzeit assimiliert.

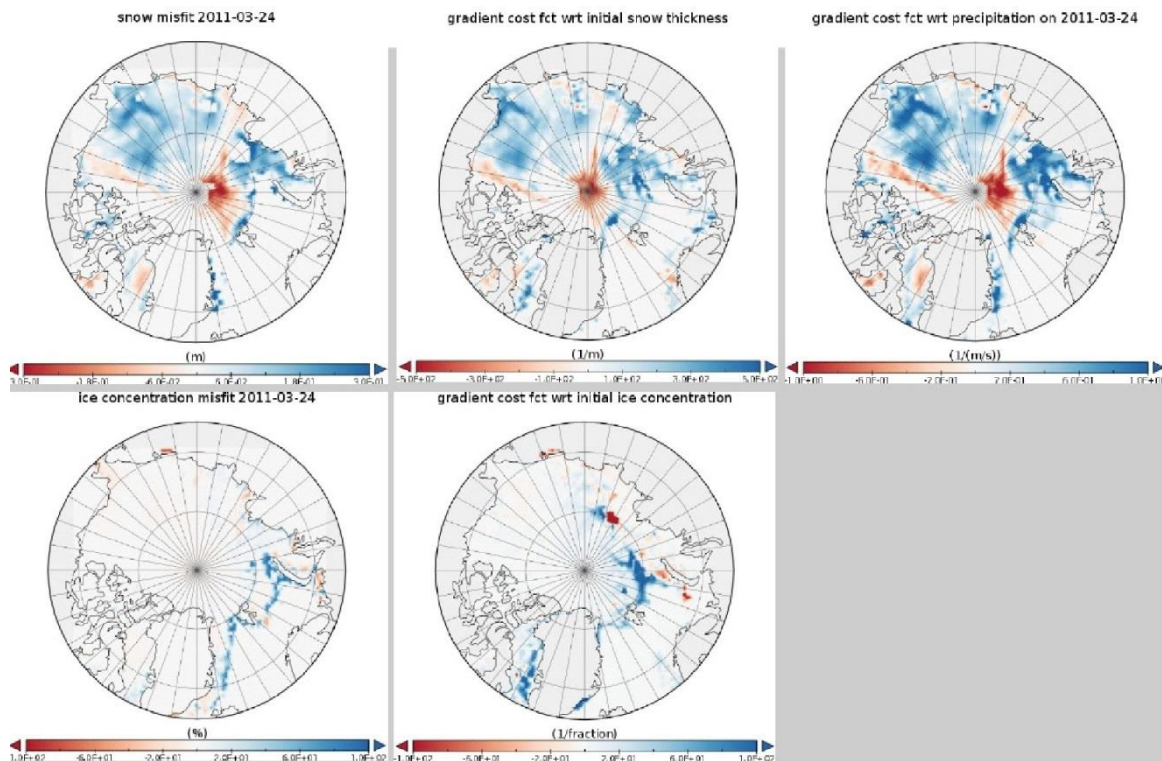


Abbildung 12 Differenz zwischen Modell und Beobachtungsdaten (Misfit) für die Schneedicke (oben links) und die Eiskonzentration (unten links) am 24.3.2011, sowie Gradient der Kostenfunktion bzgl. der initialen Schneedicke (oben Mitte), des Niederschlages am 24.3.2011 (oben rechts), und der initialen Eiskonzentration (unten Mitte).

Hierzu muss zum einen eine Verknüpfung der teils lückenhaften Information aus Beobachtungen mit den stetig vorliegenden aber teils ungenauen Modellergebnissen erfolgen. Dabei müssen die jeweiligen Unsicherheiten berücksichtigt werden. Einfache Assimilationsverfahren nähern dabei die Modellwerte den Beobachtungsdaten an, jedoch ohne die Modellphysik zu berücksichtigen. Während dies zunächst eine bessere Übereinstimmung von Modellergebnissen und assimilierten Beobachtungen bewirkt, ergibt sich ein Problem wenn von dem analysierten Zustand Vorhersagen gestartet werden sollen, da eine starke anfängliche Modelldrift auftritt sobald das Modell nicht mehr an die Daten herangezogen wird (initialisation shock). Dies wird bei der vergleichsweise aufwändigen variationellen Datenassimilation vermieden. Hier wurde mit Hilfe des von FastOpt entwickelten Werkzeuges Transformation of



Gefördert durch:  
 Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie  
aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Entwicklung und Erprobung eines gekoppelten  
Eisvorhersage- und Routenoptimierungssystems

Förderkennzeichen: 03SX328A

31. März 2015

Hamburgische Schiffbau-  
Versuchsanstalt GmbH

Nils Reimer

Algorithms in Fortran (TAF) ein adjungiertes Modell von NAOSIM generiert. Ziel der Assimilierung ist die Abschätzung eines optimalen Zustandes des Modells durch Minimierung einer Kostenfunktion. Diese quantifiziert den Abstand der Modellergebnisse von den Beobachtungsdaten unter Berücksichtigung der jeweiligen Unsicherheiten. Dazu werden die Anfangsbedingungen der sogenannten Kontrollvariablen mittels des in der Zeit rückwärts laufenden injungierten Modells zu einem Zeitpunkt  $t-x$  (hier sechs Tage) so verändert, dass die Kostenfunktion entlang der Modelltrajektorie über die vergangene Woche minimiert wird. Vermittels der Bestimmung des Gradienten der Kostenfunktion wird getestet, wie groß das Inkrement der Änderung der Anfangsbedingungen gewählt werden kann und ob der errechnete Zustand tatsächlich der optimale Zustand ist, oder ob die Anfangsbedingungen weiter verändert werden müssen. Während der Entwicklungsphase des Analyse- und Vorhersagesystems wurden die Gradienten der auf den Beobachtungsdatensätzen beruhenden Kostenfunktion auf ihre Richtigkeit (mithilfe von finiten Differenzen Tests an ausgesuchten Gitterpunkten für alle Kontrollvariablen) und auf Konsistenz getestet. Als Beispiel zeigt Abb.12 die Differenz zwischen Modell und Beobachtungen (Misfit) sowie den Gradienten der Kostenfunktion. Man erkennt z.B. große positive Gradienten (rot) der Kostenfunktion bezüglich der initialen Schneedicken in Gebieten mit einem großen Misfit (das Vorwärtsmodell überschätzt die Schneedicke). Abbildung 13 zeigt eine Skizze zum zeitlichen Ablauf des Analyse und Vorhersagesystems. Zur Zeit 'null' stehen die Beobachtungen der vergangenen Tage mit einem Tag Verzögerung zur Verfügung. Die Verzögerung ist dabei durch die Bereitstellung der Daten bei den Projektpartnern und die dortige Prozessierung gegeben. Mit diesen Daten wird nun ein optimierter Modellzustand für den aktuellen Tag erzeugt. Von diesem Zustand wiederum wird das Modell sechs Tage in die Zukunft gerechnet, wobei Vorhersagen der atmosphärischen Bedingungen vom ECMWF als Antrieb dienen.

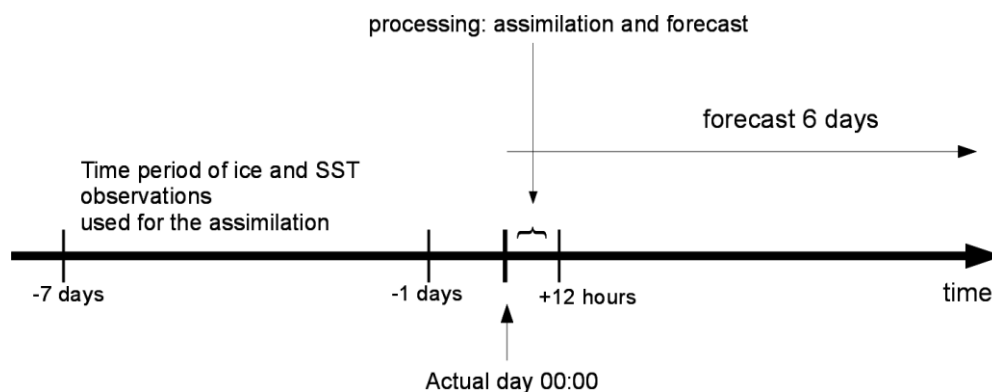


Abbildung 13 Der zeitliche Ablauf der Prozesskette

Abbildung 14 zeigt die Reduzierung der Kostenfunktion (Abweichung zwischen Modellwerten und Beobachtungen unter Berücksichtigung der jeweiligen Unsicherheiten) für eine Optimierung die am 15. März 2013 gestartet wurde. Die Assimilierungsperiode erstreckte sich also vom 9. bis zum 14. März 2013, die zugehörige Vorhersage vom 15. März 00:00 bis zum 20. März 24:00. Es ist gut zu sehen, dass die Kostenfunktion schon nach 30 Iterationen (grün) sehr stark reduziert ist. Insbesondere die 2 Beiträge zur Kostenfunktion der Schnee- und Eisdicken liegen schon sehr nahe am Wert nach 100 Iterationen (rot). Daher wurde für den Betrieb des Systems die Iteration nach dem 30. Schritt beendet, um die optimierten Randbedingungen möglichst frühzeitig an die Projektpartner liefern zu können. Dies ist auch sinnvoll, da im fortlaufenden Betrieb bereits ein optimierter Ausgangszustand vorliegt und die Änderungen damit geringer ausfallen als im Testbetrieb. Das gesamte System benötigt für die Bearbeitung der Eingangsdaten, die Assimilierung, die Vorhersage sowie für die Bereitstellung der Daten weniger als 12 Stunden 'wallclock time'.

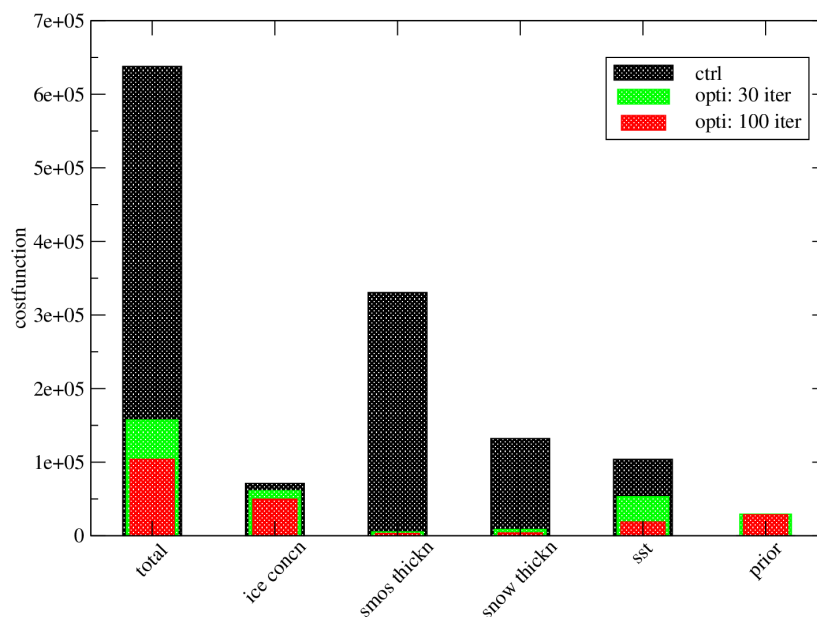


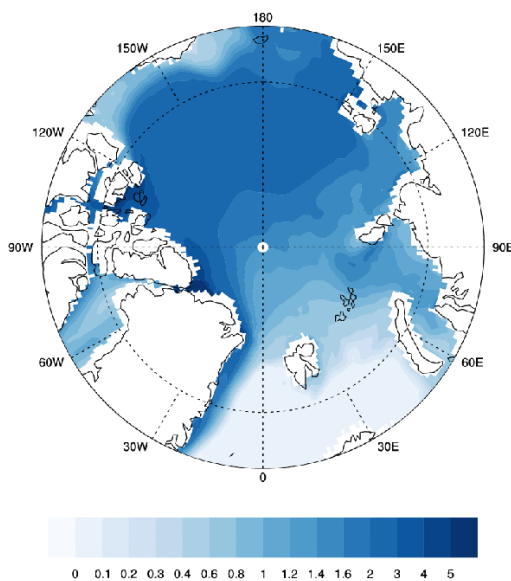
Abbildung 14 Die totale Kostenfunktion sowie die einzelnen Beiträge der verschiedenen Beobachtungsgrößen und der 'prior'-Term vor der Assimilierung (schwarz), nach 30 Iterationen (grün) und nach 100 Iterationen (rot)

Die Eisdicken am 15. März 2013 sind in Abbildung 15 für einen Kontrolllauf (links) und für einen optimierten Lauf nach 30 Iterationen (rechts) dargestellt. Deutlich sind die veränderten Eisdicken zwischen Spitzbergen und Novaja Zemlya erkennbar. Westlich von Novaja Zemlya ist ein Gebiet nach der Assimilierung eisfrei, das im Kontrolllauf eisbedeckt war. In Bereichen mit sehr dickem Eis



(zentrale Arktis) ist die Eisdicke in beiden Experimenten nahezu unverändert, da die zur Assimilierung zur Verfügung stehenden SMOS Eisdicken der Universität Hamburg nur Informationen über relativ dünnes Eis ( $< 1\text{m}$ ) zuverlässig liefern. Viel deutlichere Anpassungen als für die Eisdicke sind in der zentralen Arktis bezüglich der Schneedicken zu sehen (Abb. 16). In weiten Teilen dieses Gebietes sind die Schneedicken im optimierten Lauf stark reduziert. Wegen der stark isolierenden Wirkung von Schnee ist eine realistische Schneeauflage sehr wichtig für die Thermodynamik und somit das Schmelzen/Bilden vom Meereis. Da der hydrologische Kreislauf von den Reanalyseprodukten des ECMWF nur sehr unzureichend beschrieben wird (und in Folge auch die mit NAOSIM simulierte Schneeauflage fehlerhaft ist), kommt der Assimilierung der Schneedicken eine größere Bedeutung zu, als man es von ihrer rein mechanischen Auswirkung auf die Schifffahrt her vermuten würde. Ende 2013 bis Anfang 2014 wurde schließlich das quasi-operationelle System in Echtzeit in Betrieb genommen. Hierzu wurden die Datenströme der zu assimilierenden Beobachtungen automatisiert. Während die Eiskonzentration und -dicke sowie die Schneebedeckung direkt auf dem NAOSIM Modellgitter auf dem IRO-2 Projektserver zur Verfügung standen, wurden die SST-Daten direkt vom OSI-SAF Server heruntergeladen und durch O.A.Sys auf das Modellgitter interpoliert. Im Übrigen wurde wie für die Testphase verfahren.

**Ctrl: Ice thickness (m) - March 15th 2013**



**Opti30: Ice thickness (m) - March 15th 2013**

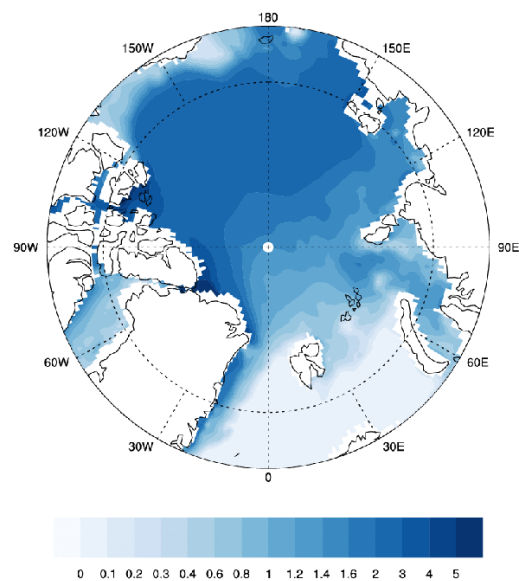


Abbildung 15 Die Eisdicke [m] am 15. März 2013 im Kontrolllauf (links) und in einem optimierten Lauf (rechts, nach 30 Iterationen)



Gefördert durch:  
 Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie  
aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Entwicklung und Erprobung eines gekoppelten  
Eisvorhersage- und Routenoptimierungssystems

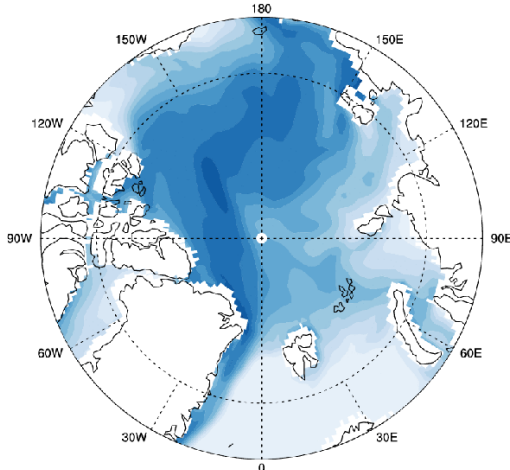
Förderkennzeichen: 03SX328A

31. März 2015

Hamburgische Schiffbau-  
Versuchsanstalt GmbH

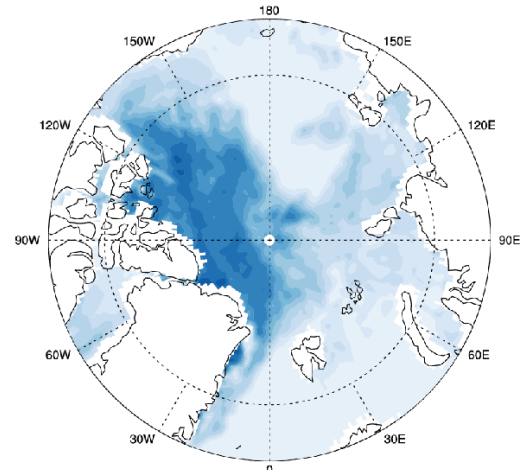
Nils Reimer

**Ctrl: Snow thickness (m) - March 15th 2013**



0 0.05 0.1 0.15 0.2 0.25 0.3 0.35 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8

**Opti30: Snow thickness (m) - March 15th 2013**



0 0.05 0.1 0.15 0.2 0.25 0.3 0.35 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8

Abbildung 16 Die Schneedicke [m] am 15. März 2013 im Kontrolllauf (links) und in einem optimierten Lauf (rechts, nach 30 Iterationen)

Während der IRO-2 Testfahrt wurde vom 14.03.2014 bis zum 05.04.2014 jeden Tag ein Assimilations und Vorhersageexperiment gestartet. Nach der Testfahrt wurden entsprechende NAOSIM Hindcasts mit den dann erhältlichen ECMWF-Analysen der atmosphärischen Bedingungen (in die dort wiederum atmosphärische Beobachtungen assimiliert wurden) für denselben Zeitraum gerechnet. Zur Evaluierung des ICEDAS Systems wurden die Ergebnisse der Assimilationsläufe und Vorhersagen mit Beobachtungen verglichen. Hierzu wurden zunächst die Beobachtungen der Eiskonzentration, der SMOS Meereisdicke, der Schneedicke sowie der SST herangezogen. Dabei wurde die Abweichung als Kostenfunktion (Summe über alle Modellgitterzellen für die zum entsprechenden Zeitraum Beobachtungsdaten vorliegen) berechnet. Insgesamt zeigen die Kostenfunktionen das erwartete Verhalten, mit relativ niedrigen und im Verlauf der Zeit langsam ansteigenden Werten während der Assimilationsphase und schneller ansteigenden Werten in der Vorhersagephase. Auch die Variation zwischen den einzelnen Analysen/Vorhersagen (dargestellt als vertikale Balken) nimmt im Verlauf der Zeit zu. Einen Sonderfall nimmt die SST ein, hier waren teilweise durch hohe Wolkenbedeckung wenige Beobachtungsdaten verfügbar, was zu jeweils niedrigen Werten in der Kostenfunktion für diesen Tag führte. Der Einfluss des atmosphärischen Antriebs während der Vorhersagephase ist verglichen mit dem Gesamtfehler gering - der Antrieb mit Analysen (schwarze Kurven in Abb. 17) bewirkt nur eine geringe Verbesserung gegenüber den Echtzeitvorhersagen (rote Kurven).

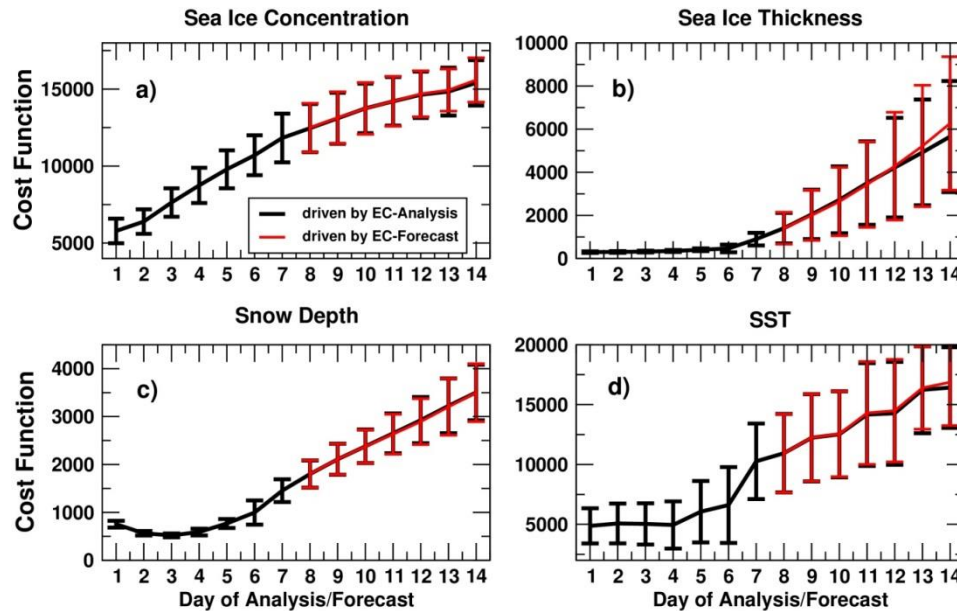


Abbildung 17 Zeitliche Entwicklung der Kostenfunktion (Abweichung zwischen Modellergebnissen und Beobachtungen, Summe über alle Modellgitterpunkte für die zum jeweiligen Zeitpunkt Beobachtungen zur Verfügung standen). Dargestellt sind das Mittel über die 22 Analysen und Vorhersagen aller Starttage (14.3.2014 - 5.4.2014, Linien) für jeweils 14 Tage sowie deren Standardabweichung (vertikale Balken). Hierbei zeigen die Tage 1-7 die Werte für die Assimilationsläufe, die Tage 8-14 für die Echtzeitvorhersagen während der IRO-2 Testfahrt angetrieben mit ECMWF Vorhersagen (rot) bzw. mit ECMWF Analysen für den gleichen Zeitraum nachgerechnet (sogenannte Handsatz, schwarz)

### 2.1.3 AP 1 Regionales Eisvorhersagemodell HAMMER

Ziel des Teilprojektes der Universität Hamburg war die Entwicklung eines regionalen hochauflösenden Eisvorhersagesystems - das *Hamburger System für Mesoskalige Eisvorhersage zur Routenoptimierung* (HAMMER) - basierend auf den beiden existierenden Modellen METRAS/MESIM (Atmosphäre/Eis) und HAMSOM (Ozean). Das HAMMER-System wird mit Fernerkundungsdaten (Kapitel 2.1.1) und Randbedingungen aus dem arktisweiten Assimilations-Eismodell ICEDAS (Kapitel 2.1.2) initialisiert und nutzt zur Vorhersage globale Wettervorhersagen vom ECMWF. Nach einer Entwicklungs- und Optimierungsphase wurde HAMMER als Komponente des IRO-Gesamtsystems unter Realbedingungen erprobt. Während des Erprobungsexperimentes in der Barentssee wurden atmosphärische und ozeanographische Messungen durchgeführt, anhand derer das Modellsystem evaluiert und bewertet wurde. Zur



Erreichung des Ziels, Eisverhältnisse über 3-5 Tage mit einer hohen Auflösung vorherzusagen, wurden zunächst METRAS/MESIM und HAMSOM weiterentwickelt und an die lokalen Verhältnisse angepasst. Zum Beispiel sollten Gezeiten realistisch simuliert werden können. Die Modelle wurden durch physikalische und technische Optimierungen operationell nutzbar gemacht und es wurde ein Kopplungskonzept entwickelt, welches die unterschiedlichen Modellgitter von HAMSOM und METRAS/MESIM berücksichtigt. Anschließend wurden die Modelle mit den übrigen nötigen Komponenten zum System HAMMER zusammengebunden, welches alle Schritte von der Aufbereitung der Eingangsdaten bis hin zur Bereitstellung der Ergebnisse an die Projektpartner zentral verwaltet.

### Spezifikation und Anwendung

Das in IRO-2 entwickelte System HAMMER kann für gekoppelte Vorhersagen des Systems der Komponenten Meereis, Ozean und Atmosphäre genutzt werden. Die Kopplung der Teilmodelle für Ozean-, Eis- und Atmosphäre basiert auf der OASIS-Software, welche die Synchronisation und Gitterinterpolation unterstützt. HAMMER ist ein Ausschnitts Modell, welches an den Modellrändern Ergebnisse grobskaligerer Modelle verwendet. In der IRO-2 Konfiguration wurde ein 830 km x 1125 km ausgedehntes Modellgebiet mit einer horizontale Gitterweite von 5 km genutzt.

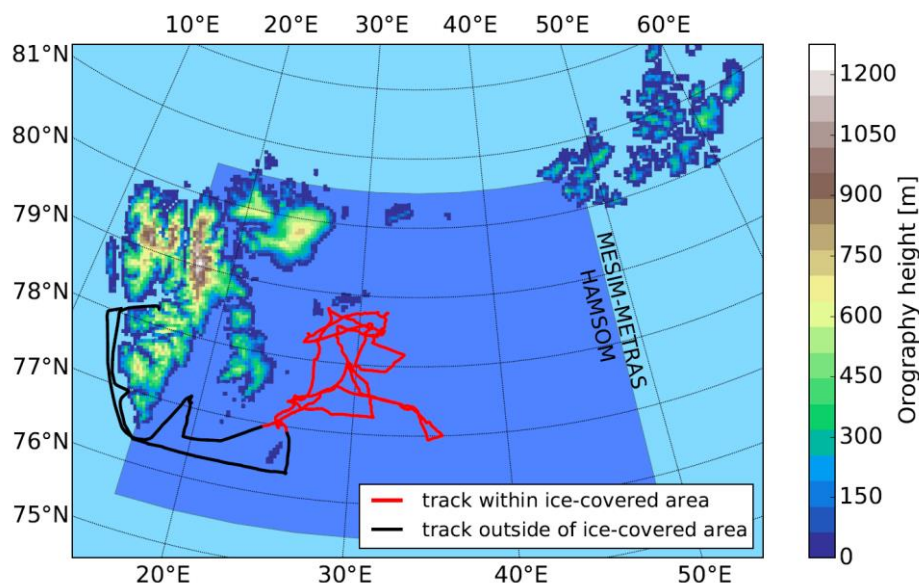


Abbildung 18 Modell-Region der HAMMER-Komponenten MESIM-METRAS (Meereis/Atmosphäre) und HAMSOM (Ozean) mit der Route von R/V Lance (rot: im Eis, schwarz außerhalb).

Das entwickelte Laufzeitsystem ist für eine Vorhersage basierend auf den 0 UTC und 12 UTC Läufen des HRES vom ECWMF konfiguriert. Die Vorhersagedauer beträgt 144 Stunden bezüglich des Analysezeitpunkts. Weitere Modell- und Fernerkundungsdaten aus der IRO-2 Modellkette werden zur Initialisierung vorausgesetzt. Mithilfe der ecFlow basierten Workflowsteuerung startete die Prozessierungskette während der operationellen Erprobungsphase selbsttätig um 6 Uhr und um 18 Uhr jeden Tages. Die notwendigen Eingangsdaten und Randbedingungen wurden heruntergeladen und aufbereitet. Der Anfangszustand des Ozeanmodells wurde von den Simulationen des Vortags übernommen. Die Vorhersagen wurden auf dem Klimarechner des DKRZ berechnet und die viertelstündlichen Ergebnisse instantan auf einen ftp-Server geladen und damit den Projektpartnern für die Routenberechnung zur Verfügung gestellt. Eine Übersicht der Datenabhängigkeiten sowie der Modellsuite ist in Abbildung 19 dargestellt.

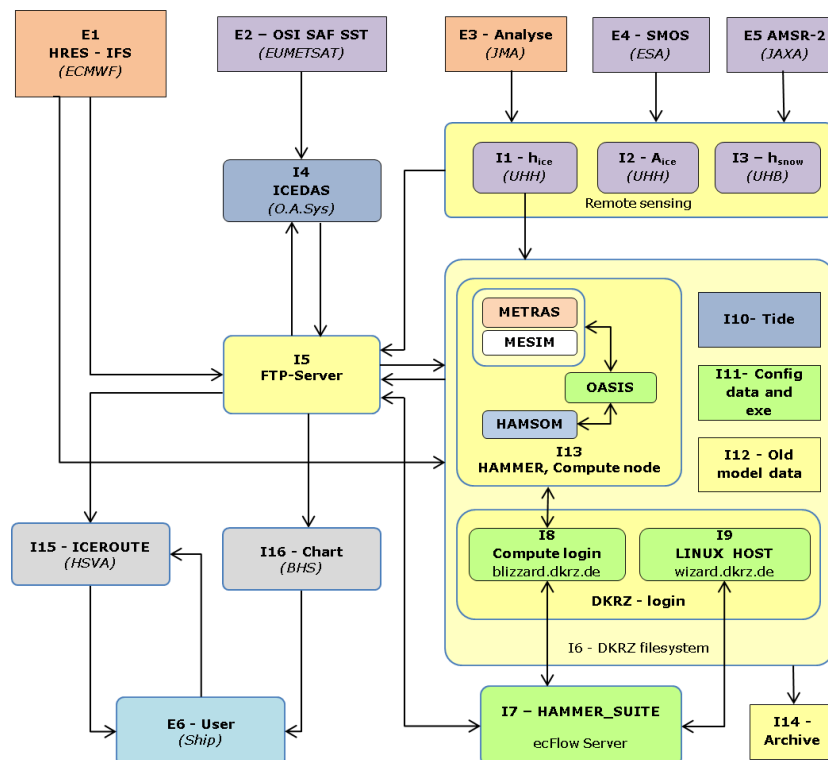


Abbildung 19 Struktur und Datenfluss zum Betrieb des HAMMER Modells

Details zum Modellaufbau, Installation und Betrieb finden sich in der technischen Dokumentation [12], Anlage des Zwischenberichts 2014-08 [18]. Ein Beispiel einer Vorhersage ist in Abbildung 20 zu sehen.

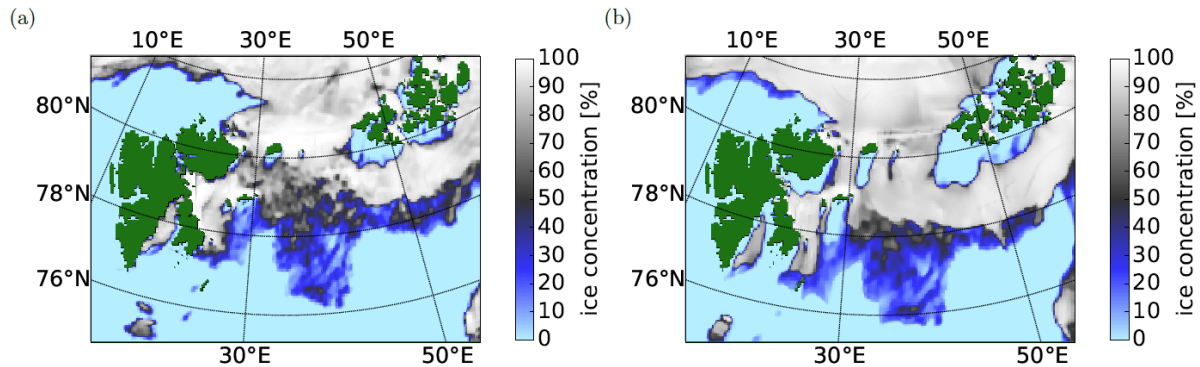


Abbildung 20 Beispiel-Vorhersage der Eiskonzentration, Modell-Lauf vom 15. März 6 Uhr: a) nach 18 Stunden, b) nach 3 Tagen.

### Bewertung

Die wesentlichen Entwicklungsziele des Projektes sind erreicht worden. Ein stabil laufendes gekoppeltes regionales Eisvorhersagemodell konnte entwickelt und in das parallel im Projektkonsortium entwickelte Gesamtvorhersagesystem eingebettet werden. Ein weitestgehend automatischer Ablauf ermöglicht einen reibungslosen Vorhersagebetrieb. Aufgrund der Vielzahl der beteiligten Komponenten und Datenquellen ist eine Überwachung durch einen Operator für den Vorhersagebetrieb nötig, wie diese auch bei vergleichbaren Systemen z.B. im Wetterdienstbereich üblich ist. Im Anwendungsfall zeigte sich, dass HAMMER schnell genug operiert, um Vorhersagen rechtzeitig an Schiffe melden zu können. Die produzierten Modellergebnisse waren hilfreich für die Besatzung und die Anwendung der Vorhersagen auf Navigationsfragen deckte weitere empfehlenswerte Verbesserungsmöglichkeiten auf. Außerdem konnte ein umfangreicher Beobachtungs- und Messdatensatz gewonnen werden, der zur weiteren Evaluierung von HAMMER genutzt werden kann.

Neben der Kopplung, Automatisierung und Systementwicklung waren wesentliche Arbeiten im Projekt auch die Laufzeitoptimierung. In diesem Bereich hat nicht vom Projekt geförderte Unterstützung von Seiten des Deutschen Klima Rechenzentrums zum Projekterfolg beigetragen. Dieser Support hat Schwächen des im Bereich der Modelloptimierung zu knapp kalkulierten Projektantrags ausgeglichen. Im Bereich der Laufzeitoptimierung konnten großer Verbesserungen an den Modellkomponenten für das Eis und die Atmosphäre erzielt werden. Informationen zu den Laufzeitoptimierungen finden sich in den Zwischenberichten [13] – [18] sowie in [19]. Diese Verbesserungen sind von der IRO-2 Modellversion in die allgemeine M-SYS (METRAS/MESIM) Modellversion übernommen worden, stehen damit für Arbeiten außerhalb des IRO-2 Prototyps



Gefördert durch:  
 Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie  
aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Entwicklung und Erprobung eines gekoppelten  
Eisvorhersage- und Routenoptimierungssystems

Förderkennzeichen: 03SX328A

31. März 2015

Hamburgische Schiffbau-  
Versuchsanstalt GmbH

Nils Reimer

zur Verfügung. Nur durch die Laufzeitverbesserungen konnte das Projektziel eines Vorhersagebetriebs, d.h. schneller als Echtzeit erzeugte Modellergebnisse, erreicht werden. Für eine Produktnutzung im Vorhersagebetrieb ist die Modelllaufzeit trotz des Projekterfolgs dennoch als Schwachpunkt des gekoppelten Modellsystems zu bewerten. Um feinere Modellauflösungen oder größere Gebiete zu ermöglichen wäre weitere Arbeit zu investieren.

Simulationen und theoretische Studien zeigen, dass sowohl Tide als auch Windeinflüsse die Eissituation während einer mehrtägigen Vorhersageperiode beeinflussen [19]. Dies spricht für den gewählten, teuren Ansatz ein vollgekoppeltes Modell zu verwenden, da dadurch potentiell einflussreiche Modellfehler ausgeschlossen werden können, die in nicht oder weniger gekoppelten Modell prinzipiell nicht behebbar sind. Zum Beispiel wirkt eine veränderte Meereisbedeckung auf den Wind, der wiederum die Eisdrift verändert. Eine quantitative Aussage dazu, ob die interaktive Kopplung des Eismodells mit der rechenzeitaufwendigen Atmosphäre und dem des bis auf die Tide langsamen Ozeans gegenüber eines ausschließlich mit statischen Windfeldern und Ozeanströmung angetrieben Eismodells einen zusätzlichen Vorteil erzeugt, ist mit den bisherigen Analysen noch nicht möglich.

Der Nutzen von HAMMMER zeigt sich bei einer statistischen Evaluationsmethode, die auf die Befahrbarkeit von zufällig gewählten hypothetischen Schiffsrouten abzielt. Zwar hält HAMMMER schiffbare Routen öfter als Persistenzvorhersagen für nicht befahrbar, dafür sagt es aber nicht-schiffbare Routen zuverlässiger voraus und bewahrt damit manche Schiffe vor Gefahr [19].

Das entwickelte Regionalmodell erstellt Eisvorhersagen unter Einfluss von Wind und Ozeanströmung. Auf eine Nutzbarmachung des (vorhandenen) thermodynamischen Modellteils (frieren und schmelzen) ist in IRO-2 aus Zeitgründen verzichtet worden, um termingerecht zur Erprobungsfahrt ein lauffähiges Modellsystem zur Verfügung zu haben.

Neben der technischen Systementwicklung hat das Projekt wesentlich zum Wissenstransfer zwischen den Projektpartnern beigetragen. Insbesondere wurden geowissenschaftliche und ingenieurwissenschaftliche Modellierungsansätze und Daten abgeglichen sowie Erfahrungen über den Betrieb von operationellen Vorhersagesystemen in den Hochschul- und Wissenschaftsbereichen eingebracht. Damit hat das Projekt durch die Arbeit an einem gemeinsamen Vorhersagesystems zur Vernetzung des Wissens von deutschen Akteuren der Eismodellierung und Routenoptimierung beigetragen.



## 2.1.4 AP3 Routenoptimierungssystem

### Einleitung

Das Routenoptimierungsmodul erhält die Ergebnisse des regionalen, hochaufgelösten Eisvorhersagemodells als Eingabe. Hierfür wurden Schnittstellen geschaffen um die Ausgabeparameter für jeden Zeitschritt direkt einlesen zu können. Die Auswahl und Auflösung der einzelnen Parameter wurde zwischen den an AP1, AP2 und AP3 beteiligten Partnern abgestimmt.

Tabelle 1 Parameteranforderungen der Routenoptimierung

Parameter	Einheit	Bereich	Auflösung
Breitengrad	deg, armin	0-360	0.01 arcmin
Längengrad	deg, arcmin	0-360	0.01 arcmin
Wassertiefe	m	0-2000	0.5m
Windrichtung	deg	0-360	1 deg
Windgeschwindigkeit	m/s	0-200	0.01m
Richtung des Stroms	deg	0-360	1 deg
Strömungsgeschwindigkeit	m/s	0-10	0.01m/s
Seegangrichtung	deg	0-360	1 deg
Signifikante Wellenhöhe	M	0-10m	0.1m
Mittlere Wellenperiode	S	0-20s	0.1s
Eiskonzentration	-	0.0 - 1.0	0.01
Schollengröße	M	0-500m	5m-10m
Eisdicke	M	0-10	0.1m
Schneedicke	M	0-10	0.1m
Biegefestigkeit vom Eis	Pa	0- 2000kPa	5kPa-10kPa
Ridgehäufigkeit	-	0-100%	1%
Ridge Kieltiefe	M	0-30m	0.2m
Ridge Kielbreite	M	0-150m	0.5m
Eisdruck	MPa	0-2MPa	0.005 MPa

Die Auflistung in Tabelle 1 entspricht einer idealen Verfügbarkeit der relevanten Parameter in hoher Auflösung und ist in dieser Form aus dem numerischen Vorhersagemodell nicht zu erreichen. Sie wurde aber zur Abstimmung der Datenübergabe zwischen den Modulen als Diskussionsgrundlage verwendet.

Das Routenpotimierungsprogramm liefert auf Basis der Eisinformationen und der schiffsspezifischen Geschwindigkeitsprognosen die Routenvorschläge als Wegepunktliste und maximalen Geschwindigkeiten auf den Teilabschnitten dazwischen. Diese Ausgabe wird direkt im Programm in das gängige ENC Format Rt3 umgewandelt. Somit können die Routen an Bord dargestellt und falls erforderlich von der Schiffsführung weiter editiert werden.

Durch die Abstimmung der Schnittstellen konnte eine flüssige Prozesskette zwischen den einzelnen Modulen erreicht werden. Vor der Erprobung des Systems wurden alle Schnittstellen getestet um einen reibungslosen Ablauf während der Erprobungsfahrt zu gewährleisten.

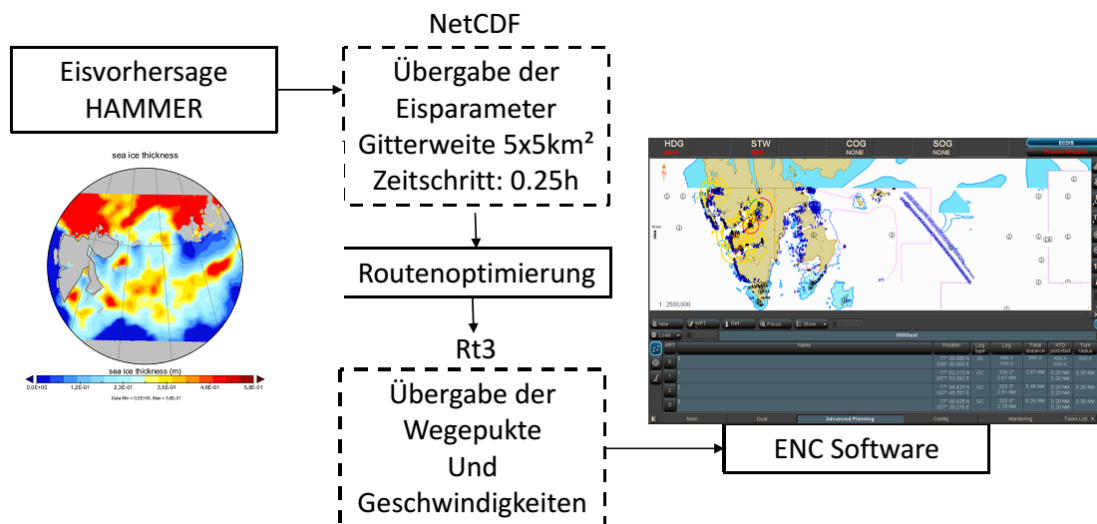


Abbildung 21 Datenfluss zwischen regionalen Eismodell, Routenoptimierung und Schiff

### Entwicklung von Prognoseverfahren für unterschiedliche Eisformationen

Um die Fahrtzeit auf unterschiedlichen Routenoptionen durch wechselnde Eisformationen vorhersagen zu können wurden im ersten Schritt Prognoseverfahren für die erreichbare Geschwindigkeit in den häufigsten Eistypen

- Ebenes Eis
- Gebrochenes Eis
- Presseisrücken
- Packeis





Gefördert durch:  
 Bundesministerium  
 für Wirtschaft  
 und Energie  
 aufgrund eines Beschlusses  
 des Deutschen Bundestages

## Entwicklung und Erprobung eines gekoppelten Eisvorhersage- und Routenoptimierungssystems

Förderkennzeichen: 03SX328A

31. März 2015

Hamburgische Schiffbau-  
 Versuchsanstalt GmbH

Nils Reimer

aus Modellversuchsergebnissen entwickelt. Hierzu wurde neben der Nutzung vorhandener Modellversuchsergebnisse innerhalb des Vorhabens eine Versuchskampagne mit 13 Versuchsserien durchgeführt. Die Kampagne beinhaltete Versuche in oben aufgeführten Eistypen mit zwei unterschiedlichen Schiffsmodellen, wobei das eine über eine hohe Eisbrechfähigkeit von bis zu 2m verfügte und das andere einen Entwurf für optimierte Eigenschaften im Seegang und Eis bis etwa 1.2m repräsentierte.

Tabelle 2 Übersicht der durchgeführten Modellversuche

Versuchs-Nr.	Eistyp	Eisparameter	Modell Nr.	Fahrmodus	Geschwindigkeit
1010	Scholleneis	100%	4433	geschleppt	2 und 4 Knoten
1020	Scholleneis	80%	4433	geschleppt	2 und 4 Knoten
1030	Scholleneis	69%	4433	geschleppt	3 und 4 Knoten
1040	Scholleneis	59%	4433	geschleppt	2 und 5 Knoten
2010	2 Presseisrücken	Hk = 8.5m	4433	frei	
2020	2 Presseisrücken	Hk = 6.9m	4433	frei	
3010	2 Presseisrücken	Hk = 9.4m	4433	frei	
3020	2 Presseisrücken	Hk = 6.3m	4433	frei	
4010	2 Presseisrücken	Hk = 9.6m	4433	frei	
4020	2 Presseisrücken	Hk = 8.5m	4433	frei	
5010	Scholleneis	100%	4433	geschleppt	2 und 4 Knoten
5020	Scholleneis	70%	4433	geschleppt	3 und 5 Knoten
5030	Scholleneis	61%	4433	geschleppt	2 und 6 Knoten
5040	Scholleneis	53%	4433	geschleppt	2 und 6 Knoten
6010	2 Presseisrücken	Hk = 10.5m	4743	frei	
6020	2 Presseisrücken	Hk = 11.9m	4743	frei	
7010	3 Presseisrücken	Hk = 10.5m, 8.3m, 7.7m	4743	frei	
8010	Scholleneis	77%	4743	geschleppt	2 und 4 Knoten
8020	Scholleneis	61%	4743	geschleppt	2 und 5 Knoten
8030	geschichtetes Eis		4743	geschleppt	2 und 6 Knoten
9010	Scholleneis	78%	4743	geschleppt	2 und 5 Knoten
9020	Scholleneis	65%	4743	geschleppt	2 und 5 Knoten
9030	geschichtetes Eis		4743	geschleppt	2 Knoten
9040	geschichtetes Eis		4743	geschleppt	5 Knoten
10010	Ebenes Eis mit Seitendruck	$P_{side} = 215kPa$	4743	geschleppt	3 Knoten
10020	Ebenes Eis mit Seitendruck	$P_{side} = 215kPa$	4743	geschleppt	3 Knoten
11010	Ebenes Eis mit Seitendruck	$P_{side} = 136kPa$	4743	geschleppt	3 Knoten
11020	Ebenes Eis mit Seitendruck	$P_{side} = 136kPa$	4743	frei	
11030	Scholleneis mit Seitendruck	$P_{side} = 136kPa$	4743	geschleppt	3 Knoten
12010	Ebenes Eis mit Seitendruck	$P_{side} = 195kPa$	4433	geschleppt	3 Knoten
12020	Ebenes Eis mit Seitendruck	$P_{side} = 195kPa$	4433	frei	
13010	Ebenes Eis mit Seitendruck	$P_{side} = 130kPa$	4433	geschleppt	3 Knoten
13020	Ebenes Eis mit Seitendruck	$P_{side} = 130kPa$	4433	frei	
13030	Scholleneis mit Seitendruck	$P_{side} = 130kPa$	4433	geschleppt	3 Knoten

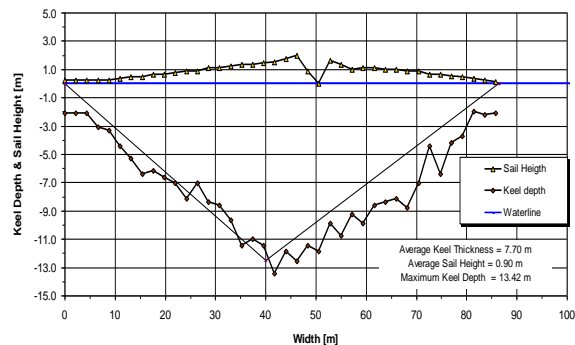
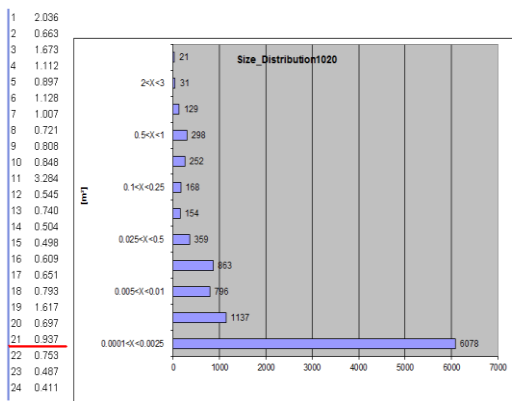


Abbildung 22 Modellversuche in unterschiedlichen Eisformationen

Aufgrund der hohen Anzahl an einflussreichen Parametern können aus den 13 Versuchsserien lediglich die charakteristischen Zusammenhänge der wichtigsten Parameter wie Eisdicke, Eiskonzentration, Tiefe der Presseisrücken und dem Schiffswiderstand gewonnen werden. Unter Nutzung zahlreicher Ergebnisse aus der Modellversuchsdatenbank können die charakteristischen Verläufe zu Regressionskurven für den Widerstand weiterentwickelt werden. Der Einfluss der Schiffsform sowie der Antriebsleistung und Propulsionsanordnung wird dabei über analytische oder vorhandene semi-empirische Verfahren [2] berücksichtigt.

Durch Verknüpfung dieser Methoden können die Propulsionspunkte für unterschiedliche, virtuelle Schiffsmodelle in den relevanten Eisverhältnissen ermittelt werden. Ein Beispiel für den Widerstandsverlauf und die erreichbare Geschwindigkeit abhängig von der Eiskonzentration ist in Abbildung 23 und 25 gegeben.

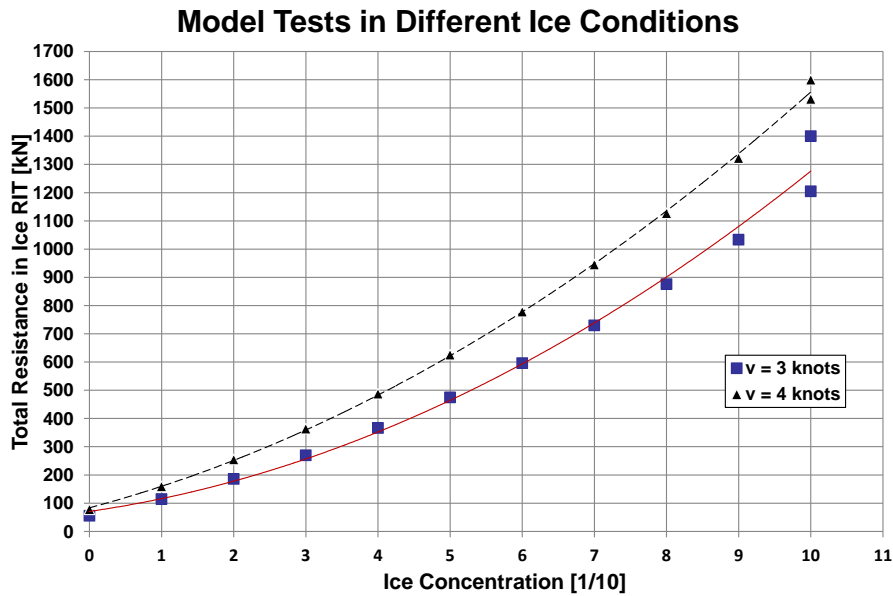


Abbildung 23 Widerstand in Abhängig der Eiskonzentration und Geschwindigkeit

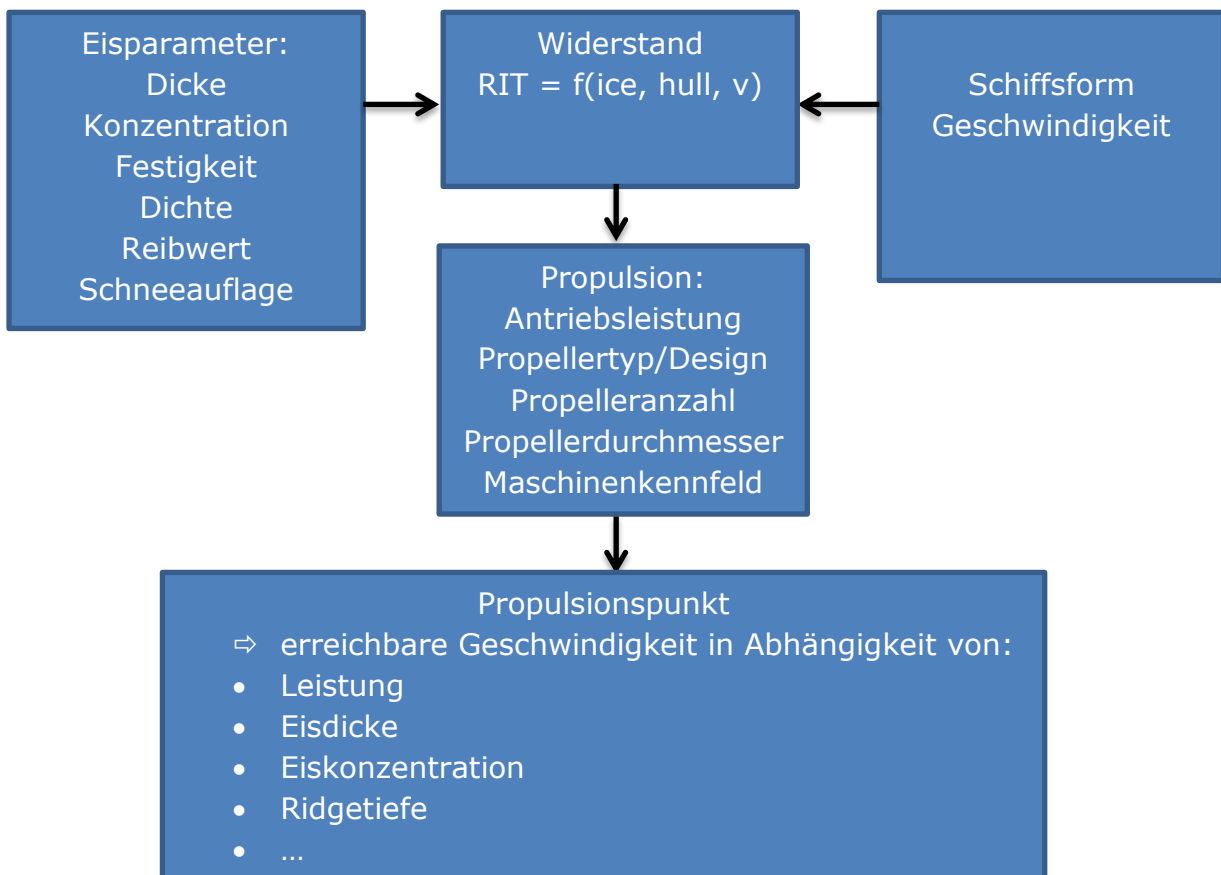


Abbildung 24 Ermittlung der erreichbaren Geschwindigkeit in unterschiedlichen Eisbedingungen

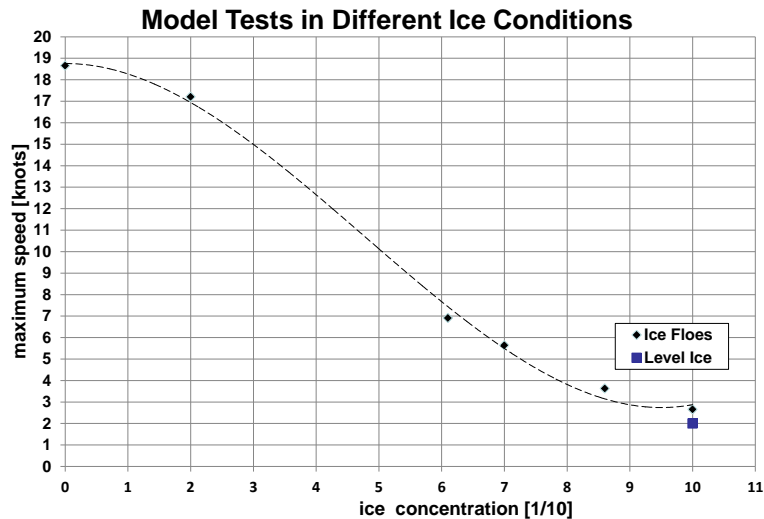


Abbildung 25 Schiffsspezifische, erreichbare Geschwindigkeit über Eiskonzentration

Für die Geschwindigkeitsprognose in ebenem Eis mit Seitendruck ist die Datenbasis aus Modellversuchen sehr gering. Innerhalb des Vorhabens wurde daher versucht, aus den wenigen, verfügbaren Daten und Beobachtungen eine Abschätzung des Zusatzwiderstandes zu ermöglichen. Als wesentlicher Effekt konnte das Anpressen des seitlichen Eises an das parallele Mittelschiff unter Druckwirkung identifiziert werden. Der Reibschluss führt zu einem erheblichen Zusatzwiderstand (Abbildung 26). Die genaue Quantifizierung des Anteils am Gesamtwiderstand erfordert allerdings eine breitere Datenbasis.

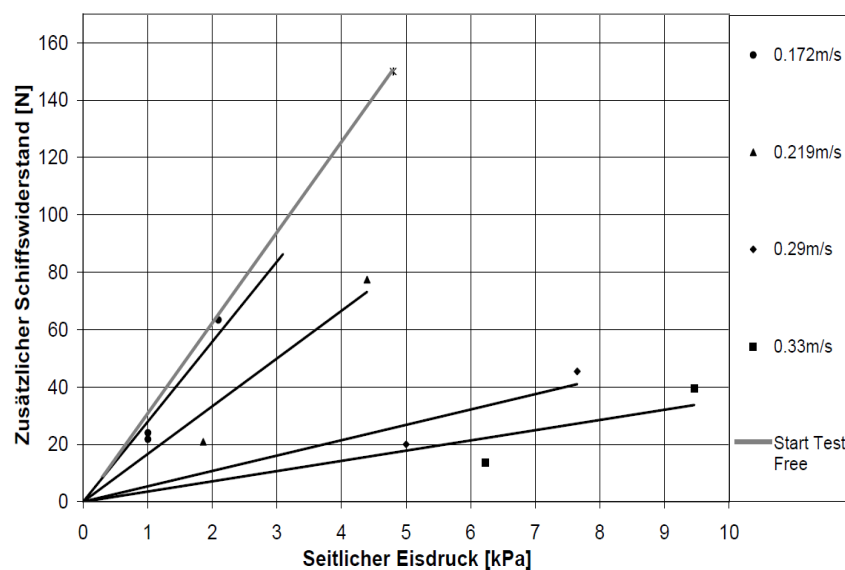


Abbildung 26 Zusatzwiderstand in Abhängigkeit des seitlichen Drucks [3]

Die Einbindung der weiterentwickelten Prognoseverfahren für unregelmäßige Eisverhältnisse, insbesondere gebrochenem Eis und Presseisrücken in eine Transitsimulation ermöglicht neben der Anwendung zur Routenoptimierung viele weitere Möglichkeiten für Untersuchungen wie zum Beispiel für Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen und Assistenz im Schiffsentwurf.

### Routenoptimierung

Die im Vorhaben entwickelte Routenoptimierung nutzt die im Vorhaben entwickelte Eisvorhersage und Geschwindigkeitsprognoseverfahren zur Bewertung und Auswahl von Routenoptionen zwischen zwei vom Anwender definierten Wegpunkten. Das Gebiet für die Optimierung ist dabei auf das Gebiet des regionalen Eisvorhersagemodells HAMMER beschränkt.

Die Optimierung besteht aus drei wesentlichen Schritten:

- Berechnung der Fahrtzeit entlang einer Routenalternative
- Änderung der Route durch Wegpunktverschiebung
- Bewertung und Vergleich der Routenoptionen

Startpunkt der Optimierung ist die Berechnung der Fahrtzeit entlang der kürzesten Route zwischen Start- und Endpunkt. Dies erfolgt iterativ, da die Eisparameter an jedem Ort von dem dazugehörigen Zeitschritt der Eisvorhersage gewählt werden müssen, die Geschwindigkeit aber ihrerseits von diesen Eisparametern abhängt. Da es möglich sein soll, die Lage der Wegpunkte später flexibel zu optimieren, können diese unabhängig von den Gitterpunkten des HAMMER Modells definiert werden. Die jeweiligen Eisparameter für jeden Wegpunkt werden durch Interpolation aus umgebenden Gitterpunkten ermittelt.

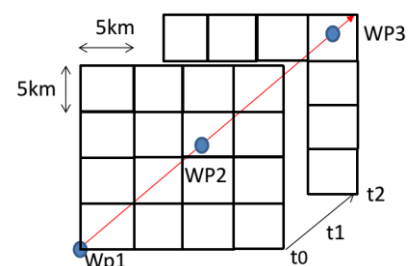
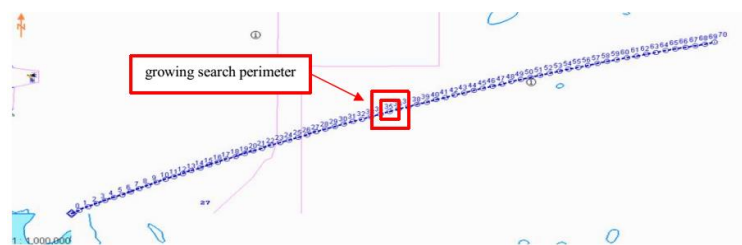


Abbildung 27 Berechnung der Fahrtzeit entlang einer Route auf den Gitterpunkten des Eismodells unter Berücksichtigung unterschiedlicher Zeitschritte

Nach der Ermittlung der kürzesten Route erfolgt die eigentliche Routenvariation. Hierzu werden zunächst die Eisverhältnisse entlang der Initialroute untersucht um Bereiche schwierigen Eises zu detektieren. Anschließend werden die Eisverhältnisse in einer definierten Umgebung um die Route gescannt. Hierzu wird ein Eis Index definiert, der den Schwergrad des Eises aus Eisdicke und Konzentration bildet. Dieser Eis Index wird ins Verhältnis zu einem Distanzindex (einem Maß für die zusätzlich zu bewältigende Strecke der Alternativroute) gesetzt.

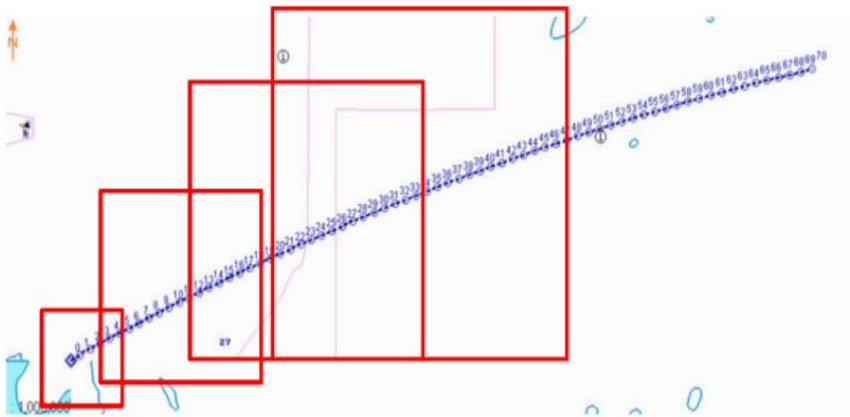


Abbildung 28 Fenster um Wegepunkte zur Ermittlung der Eisverhältnisse [4]

Um nach dem Verschieben von Wegepunkten keine unnötigen „Zick-Zack“ Kurse zu erhalten, wird in einem weiteren Schritt die Topologie der Route nachgepflegt und die Teilstrecken somit wieder geglättet.

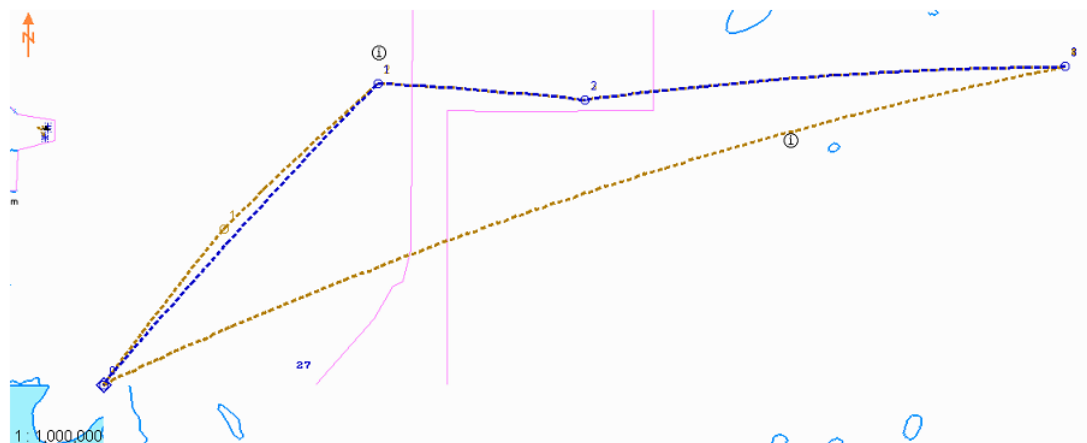


Abbildung 29 Ausgangsrouten (beige) und modifizierte Route (blau) [4]



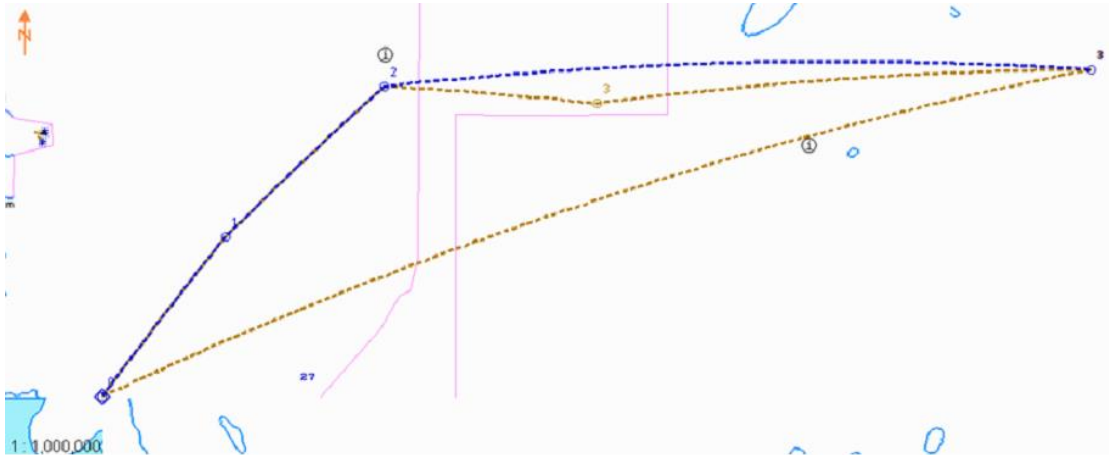


Abbildung 30 Ausgangsrouten (beige) und geglättete Routenalternative (blau) [4]

Da die Optimierung immer auf der kürzesten Route basiert, steigt die zurückzulegende Distanz mit jedem Optimierungsschritt. Die benötigte Fahrtzeit wird bei jeder Optimierung aufgrund der leichteren Eisverhältnisse geringer. Oszillationen können im Bereich von Inseln und entlang von Küstenlinien auftreten. Schon in den ersten Testläufen vor der Erprobungsfahrt auf Basis der bereits laufenden Eisvorhersage zeigte sich, dass in vielen Fällen bereits innerhalb der ersten fünf Optimierungsschritte eine deutliche Reduzierung der benötigten Fahrtzeit erreicht wurde.

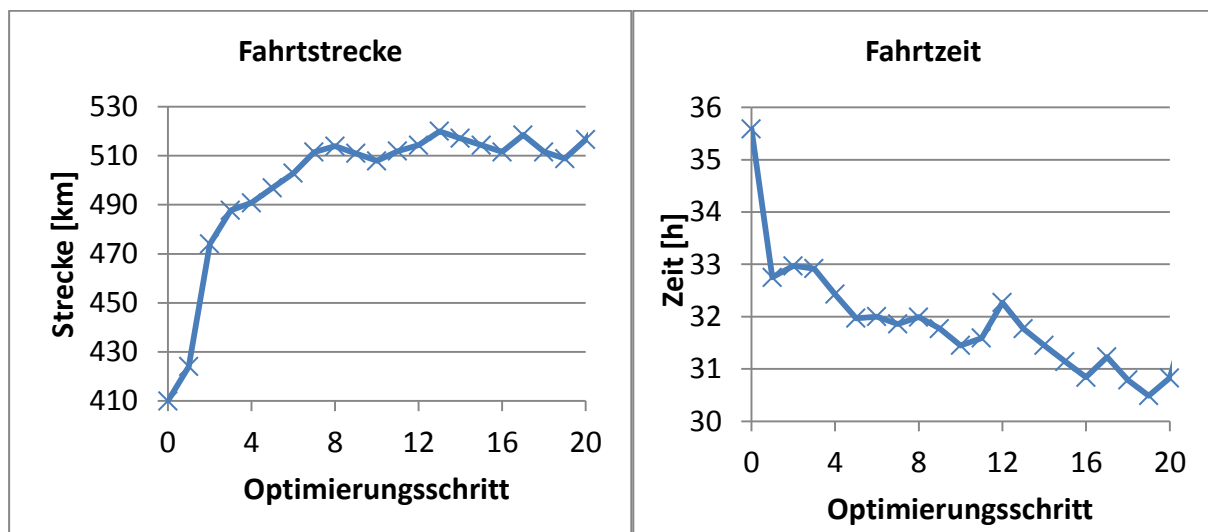


Abbildung 31 Verminderung der Fahrtzeit bei Verlängerung der Strecke

Die erreichbaren Verminderungen der Fahrtzeit unterschiedlicher Routen im Test vor der Erprobungsfahrt sind in Tabelle 3 dargestellt.

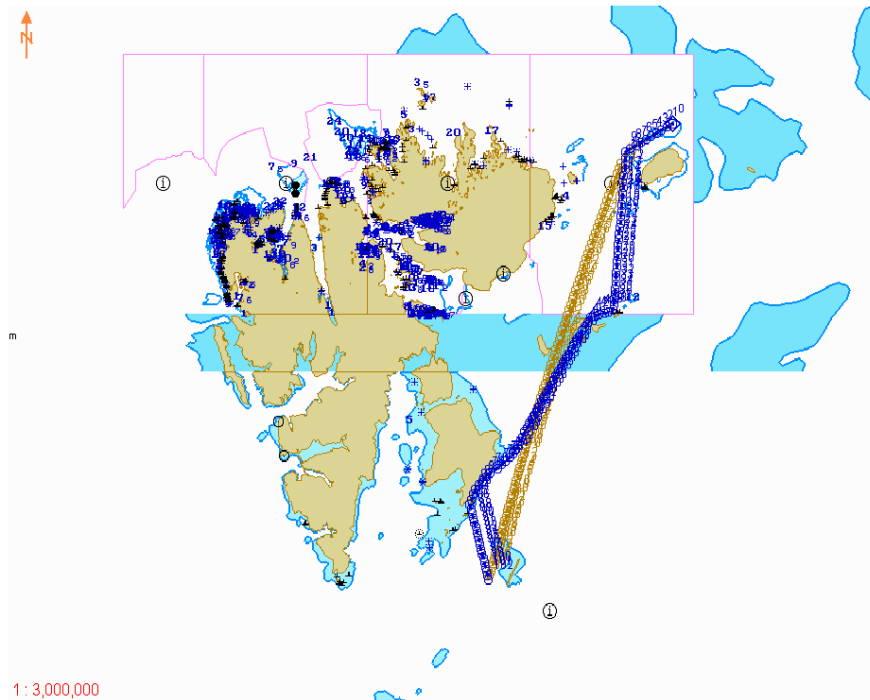


Abbildung 32 Darstellung der kürzesten und modifizierten Route in der ENC

Tabelle 3 Ergebnisse der Testrechnungen mit unterschiedlichen

Route	1	2	3	4	5
ursprüngliche Fahrtzeit [h]	40.6	40.4	32.7	45.2	31.0
kürzeste Fahrtzeit [h]	35.0	33.6	26.6	41.1	27.5
Einsparung [h]	5.6	6.8	6.1	4.1	3.5
Einsparung [%]	13.8	16.9	18.8	9.1	11.1
ursprüngliche Strecke [sm]	267.3	243.2	217.9	285.0	166.1
Strecke auf schnellster Route [sm]	288.1	269.9	256.0	288.5	197.0
zusätzlich gefahrene Strecke [sm]	20.8	26.7	38.1	3.5	30.9
Streckendifferenz [%]	7.8	11.0	17.5	1.2	18.6
ursprüngliche, mittlere Geschwindigkeit [Knoten]	6.6	6.0	6.7	6.3	5.4
mittlere Geschwindigkeit, schnellste Route [Knoten]	8.2	8.0	9.6	7.0	7.2
Geschwindigkeitsdifferenz [%]	25.1	33.5	44.6	11.3	33.5

## 2.1.5 Eisklassifizierung von SAR-Daten, Darstellung von Eiskarten

### Projektbeschreibung

Ausdehnung, Volumen und Dicke des Meereises in der Arktis nehmen ab, zusätzlich kommt es zu einer Änderung des Verhältnisses zwischen einjährigem und mehrjährigem Eis. Diese Entwicklung begünstigt die Nutzung der nördlichen Seewege, der Nordwest-Passage und des nördlichen Seeweges für den Schiffsverkehr, sowie die Gewinnung und den Abtransport von Bodenschätzen



Gefördert durch:  
 Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie  
aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Entwicklung und Erprobung eines gekoppelten  
Eisvorhersage- und Routenoptimierungssystems

Förderkennzeichen: 03SX328A

31. März 2015

Hamburgische Schiffbau-  
Versuchsanstalt GmbH

Nils Reimer

aus der Arktis. Diese mögliche zukünftige Nutzung der arktischen Gewässer erfordert eine zuverlässige, zeitlich und räumlich hochaufgelöste Eisvorhersage sowie eine optimierte Routenberatung für die Schifffahrt (vgl. Leitantrag zum Verbundvorhaben IRO-2, S.3).

Der operationelle Eisdienst des BSH ist der Dienstleister für die Bereitstellung von Eisinformationen in Deutschland. Neben den täglich aktualisierten Eiskonzentrationen und Eisdicken beinhaltet dies auch Informationen zu weiteren für die Schifffahrt relevanten Eigenschaften des Meereises, wie Schollengrößen sowie der Höhe und Lage von Presseisrücken. Über die deutschen Gewässer hinaus rückt derzeit auch der Bereich der Arktis in den Fokus des Interesses.

Neben Meldungen von Beobachtungsstationen und dem Informationsaustausch mit anderen Eisdiensten stellen Fernerkundungsdaten die wesentliche Quelle von Eisinformationen dar. Aufgrund Ihrer Unabhängigkeit von den Bewölkungs- und Lichtverhältnissen kommt SAR-Daten hierbei eine besondere Bedeutung zu. In Anbetracht der Dynamik des Meereises ist dabei eine hohe zeitliche Abdeckung der jeweiligen Untersuchungsgebiete erforderlich.

Ein Beitrag des BSH zum Projekt IRO-2 ist die Entwicklung eines Verfahrens zur automatischen Meereisklassifikation auf Basis von SAR-Daten. Für eine nähere Beschreibung der Projektaufgaben siehe Vorhabenbeschreibung zum Teilvorhaben „Eisklassifizierung von SAR Daten zur Assimilation in ein Eisvorhersagemodell der Arktis“ des Verbundvorhabens IRO-2 (Eisvorhersage und Eis-Routen-Optimierung).

#### Datengrundlage

Fernerkundungssensoren, die den Mikrowellenbereich nutzen, arbeiten im Gegensatz zu optischen Aufnahmesystemen bewölkungsunabhängig und liefern daher zuverlässig zeitlich hochaufgelöste Informationen über die betrachteten Untersuchungsgebiete. Fernerkundung via Radar mit synthetischer Apertur (SAR) stellt im Vergleich zu passiven Mikrowellen eine deutlich bessere räumliche Auflösung zur Verfügung (physikalische Auflösung von 10 -150 m je nach Sensor und Modus), die insbesondere zur Erfassung kleinräumiger Strukturen des Meereises erforderlich ist.

SAR-Systeme, die im Rahmen der Projektarbeit genutzt wurden, sind Envisat ASAR, RADARSAT-2, TerraSAR-X und COSMO-SkyMed. Zum Abschluss wurden auch noch die ersten SENTINEL-1 Daten benutzt. Die entscheidenden Faktoren bei der Auswahl der Datengrundlage für einen operationellen Betrieb sind die Verfügbarkeit sowie die anfallenden Kosten. Daher wurde anfangs mit den ENVISAT ASAR-WSM-Daten (C-Band, einfach polarisiert) geplant, da die Gebietsabdeckung relativ hoch war und die Daten kostenlos und zeitnah (Near real time) zum Aufnahmezeitpunkt zur Verfügung standen. Durch den Ausfall des Satelliten im April 2012 musste daher die Weiterentwicklung der SAR-Klassifikation im Rahmen des IRO-2 Projektes angepasst werden.

Es wurde nach Möglichkeiten gesucht, den Verlust von ENVISAT durch Daten anderer Aufnahmesysteme zu kompensieren, wobei mehrfach polarisierte Daten



Gefördert durch:  
 Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie  
aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Entwicklung und Erprobung eines gekoppelten  
Eisvorhersage- und Routenoptimierungssystems

Förderkennzeichen: 03SX328A

31. März 2015

Hamburgische Schiffbau-  
Versuchsanstalt GmbH

Nils Reimer

bzw. Daten mit höherer Auflösung aufgrund der geringeren Verfügbarkeit und Gebietsabdeckung für diesen Anwendungsbereich nur eingeschränkt in Betracht gezogen werden konnten.

Der Wide Swath Mode des ENVISAT ASAR-Sensors lieferte dabei Daten mit einer räumlichen Auflösung von 150m. Aufnahmemodi mit höherer Auflösung – wie bei anderen Aufnahmesystemen möglich – führen i.d.R. zu einer Abdeckung kleinerer Gebiete, was die Möglichkeiten der effizienten Kartierung großer Areale einschränkt. Ähnliches ist häufig bei mehrfach polarisierten Daten der Fall, auch wenn die Zusatzinformationen aus diesen Daten die Klassifikation von Meereis vereinfachen könnten. Zusätzliche Informationen, welche aus dual-polarisierten Daten (wie denen des RADARSAT-2-Sensors und der zukünftig verfügbaren Sentinel-1-Daten) gewonnen werden können, wurden im Folgenden stellenweise in die Untersuchungen mit einbezogen, um den möglichen Zusatznutzen für die operative Nutzung abzuwägen.

#### Eisklassifikation mit SAR-Daten

Es existiert bereits eine Vielzahl von Arbeiten zur Klassifikation von Meereis aus SAR-Daten. Diese basieren im Wesentlichen auf der Nutzung von statistischen Texturparametern erster und zweiter Ordnung sowie auf Wavelet-Analysen.

Texturwerte werden dabei mit einer „sliding window“-Technik berechnet, d.h. für jeden Pixel des Ausgangsbildes wird unter Berücksichtigung eines lokalen Fensters um diesen Pixel ein Texturmaß ermittelt. Dabei ist neben der Auswahl geeigneter Texturmaße die Fenstergröße zu beachten, die je nach verwendetem Texturparameter und Sensor-/Aufnahmemodus der SAR-Daten anzupassen ist.

Die Konzentration des Meereises ist dabei der erste, wichtigste Parameter, der aus den SAR-Daten abzuleiten ist. Aufbauend auf einer Klassifikation der Konzentration sollten anschließend weitere für die Schifffahrt wichtige Indikatoren identifiziert und in die Klassifikation integriert werden.

Die Durchführung der Klassifikation soll hierarchisch erfolgen. Im Vergleich zur parallelen Klassifikation bietet dies den Vorteil, dass spätere Modifikationen der Klassifikationsparameter einfacher vorgenommen werden können und damit die Adaptierbarkeit an unterschiedliche Trainingsgebiete (und ggf. Datensätze anderer Aufnahmesysteme) gewährleistet ist. Auch eine Kombination unterschiedlicher Klassifikationsalgorithmen ist auf diesem Wege möglich.

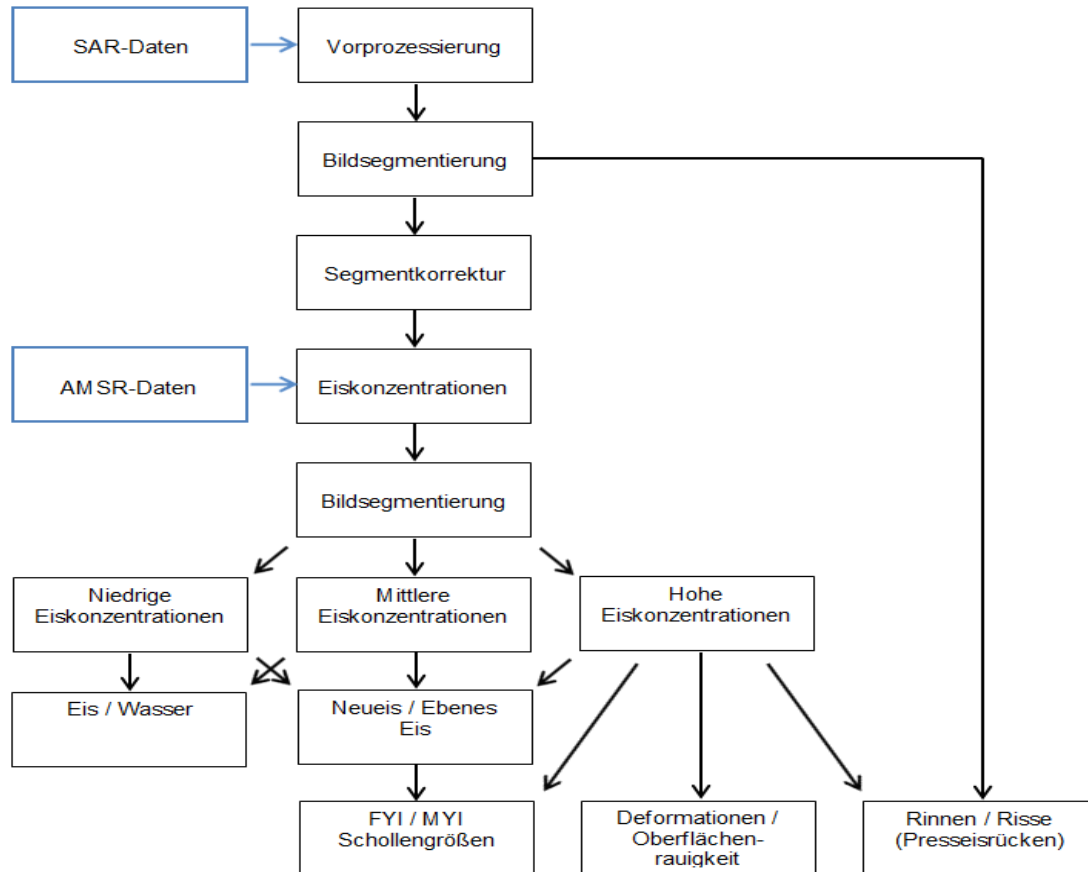


Abbildung 33 Prozessierungsübersicht

### Abbildungseigenschaften und Besonderheiten der SAR-Daten

Bekannte Anomalien bei der Interpretation von SAR-Daten im Vergleich zur Auswertung von Daten optischer Aufnahmesysteme erschweren die Entwicklung automatisierter Auswerteverfahren erheblich. Bei der Interpretation solcher Satellitendaten durch Eisanalysten werden in der Regel Zusatzinformationen herangezogen. Dies können beispielsweise Informationen über die bisherige Entwicklung der Eisverhältnisse oder die Häufigkeit des Auftretens bestimmter Eisbedingungen in bestimmten Regionen anhand klimatologischer Daten sein, ebenso wie meteorologische Daten (Luft- und Wassertemperaturen, aufgrund von Windrichtung und -stärke zu erwartende Eisbewegung etc.). Darüber hinaus werden zusätzliche Fernerkundungsdaten (optische Aufnahmesysteme, passive Mikrowellensensoren) in die Betrachtung mit einbezogen und mit den SAR-Aufnahmen verglichen. Mitunter basieren Eisinformationen auf subjektiven



Gefördert durch:  
 Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie  
aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Entwicklung und Erprobung eines gekoppelten  
Eisvorhersage- und Routenoptimierungssystems

Förderkennzeichen: 03SX328A

31. März 2015

Hamburgische Schiffbau-  
Versuchsanstalt GmbH

Nils Reimer

Erfahrungswerten der Eisanalysten, wenn bestimmte Eigenschaften des Meereises auch in den SAR-Daten nicht eindeutig erkennbar sind (z.B. aufgrund ihrer Größe im Vergleich zur Auflösung des SAR-Sensors).

Relevant für die Entwicklung eines automatisierten Auswerteverfahrens ist aber die Fähigkeit des Eisanalysten, Informationen in den SAR-Daten in unterschiedlichen Maßstabsebenen im jeweiligen Kontext der Umgebung zu erfassen. Eine automatische Eisklassifikation kann unter Berücksichtigung der äußerst heterogenen Erscheinungsformen von Meereis (Oberflächenstrukturen, Konzentrationen und Entwicklungsstadien) nur dann erfolgreich sein, wenn es gelingt, den Arbeitsprozess des Eisanalysten zumindest in Grundzügen algorithmisch nachzubilden.

#### Einfallswinkelabhängigkeit

Der Einfluss des lokalen Einfallswinkels am Untersuchungsobjekt hat signifikanten Einfluss auf das empfangene Signal am SAR-Sensor. Insbesondere in Aufnahmemodi, die die maximale Schwadbreite des Satelliten nutzen (wie ENVISAT ASAR WSM), tritt dieser Effekt deutlich hervor. Eine vollständige Korrektur der Einfallswinkelabhängigkeit der SAR-Daten ist bei einzelnen Szenen nicht möglich. Bei Verwendung mehrerer Datensätze der gleichen Szene aus dem aufsteigenden und absteigenden Orbit des Satelliten besteht zwar grundsätzlich die Möglichkeit einer Korrektur, diese wurde aber aus Gründen der Datenverfügbarkeit nicht umgesetzt. Eine Korrektur bestimmter Oberflächentypen (Eis, Wasser, Land) ist zwar bis zu einem gewissen Grad umsetzbar, hierzu müsste die Information über die Art der Oberfläche aber bereits a priori bekannt sein. Folglich sind auch alle abgeleiteten Maße (wie z.B. Texturmaße) einfallswinkelabhängig; eine Einfallswinkelkorrektur verbessert also nur die Nutzbarkeit der Intensitätswerte im Ausgangsbild.



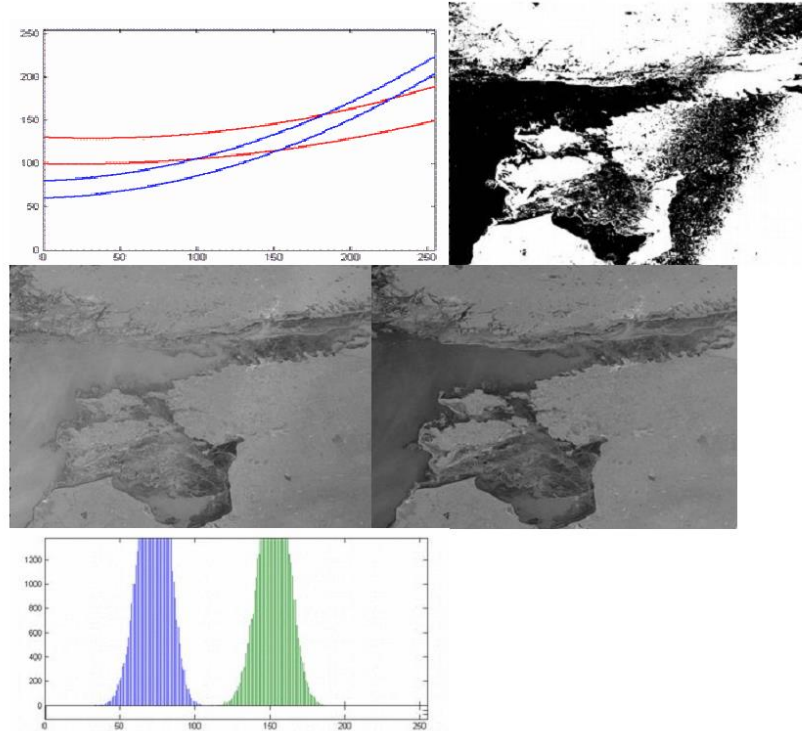


Abbildung 34 Korrektur der Einfallswinkelabhängigkeit

Sowohl für ebene (Wasser) als auch raue (Eis, Land) Oberflächen wurde der charakteristische Anstieg des Radarsignals ermittelt. Dieser wurde verwendet, um die Helligkeitswerte der Ausgangsdaten entsprechend anzupassen. A1 charakteristischer Verlauf des Helligkeitsanstiegs von Eis (blau) und Wasser(Rot)

- A2 Histogramm ähnlicher Wasserflächen in Near und Far Range  
 B ENVISAT ASAR WSM-Aufnahme, Finnischer Meerbusen  
 C Identifizierte Flächen mit rauher bzw. glatter Oberfläche  
 D korrigierte SAR-Aufnahme

### Wind- und Niederschlagseffekte auf Wasseroberflächen

Kegelähnliche Strukturen über Wasserflächen können auf starke Regenfälle hindeuten. Zahlreiche weitere auftretende Bildartefakte können ebenfalls mit Niederschlagsereignissen in Verbindung gebracht werden. Zum Aufnahmezeitpunkt dieser ENVISAT ASAR-Aufnahmen (Bottenvik, 7.2.2012) herrschte nahezu Windstille. In allen Fällen führen textur- oder pixelintensitätsbasierte Klassifikationsansätze zu erheblichen Anomalien im Ergebnis.



Gefördert durch:  
 Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie  
aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Entwicklung und Erprobung eines gekoppelten  
Eisvorhersage- und Routenoptimierungssystems

Förderkennzeichen: 03SX328A

31. März 2015

Hamburgische Schiffbau-  
Versuchsanstalt GmbH

Nils Reimer

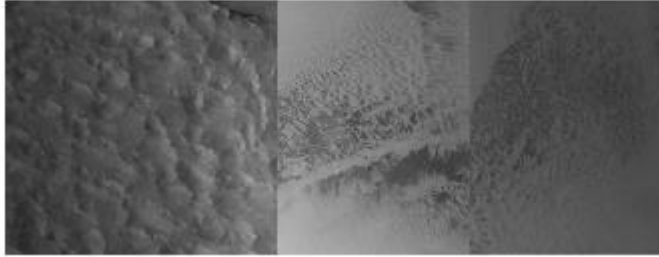


Abbildung 35 Niederschlagseffekte im SAR-Bild

Neben Regen sind in den SAR-Daten häufig Windeffekte auf Wasserflächen erkennbar. Diese treten unter anderem im Windschatten von Landmassen auf und können leicht mit Neueis oder ebenem Eis verwechselt werden, welches durch eine ähnlich geringe Rückstreuung im Radarbild charakterisiert ist.

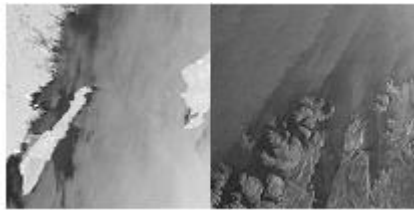


Abbildung 36 Windeffekte im SAR-Bild

### Einfluss der Wellenlänge des Radarsystems

In der einschlägigen Literatur zur Radarfernerkundung von Meereis wurde die Oberflächenrauigkeit als dominanter Streuungsmechanismus identifiziert; der Einfluss von Volumenstreuung und der dielektrischen Materialkonstanten wird für operative Betrachtungen als vernachlässigbar angesehen. Die Intensität des zurückgestreuten Radar-Signals steigt im Allgemeinen mit der Oberflächenrauigkeit im Verhältnis zur Wellenlänge des Radarsystems. Diese Wellenlänge beträgt 5,6 cm bei C-Band-Radar beziehungsweise 3,1 cm bei X-Band-Radar und liegt somit im Bereich der Größe von Frostblumen. Aufgrund dessen tritt die typische Signatur deutlicher in X-Band-SAR-Aufnahmen hervor als im C-Band. Da Frostblumen ausschließlich auf dünnem, neu gebildetem Eis entstehen, ist hierbei vor allem eine Verwechslungsgefahr mit Presseisrücken gegeben. Überfrorene Rinnen und Risse im Eis erscheinen in den SAR-Daten, ebenso wie die Wasseroberfläche bzw. Neueis / ebenes Eis mit Ausnahme bestimmter Einfallswinkelbereiche, dunkler als das sie umgebende Eis, während Presseisrücken hellere, linienförmig ausgedehnte Bildobjekte darstellen. Bilden sich auf einer überfrorenen Rinne aber Frostblumen, so kann diese aufgrund der hohen Rückstreuung des Radars fälschlicherweise für einen Presseisrücken gehalten werden.



Gefördert durch:  
 Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie  
aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Entwicklung und Erprobung eines gekoppelten  
Eisvorhersage- und Routenoptimierungssystems

Förderkennzeichen: 03SX328A

31. März 2015

Hamburgische Schiffbau-  
Versuchsanstalt GmbH

Nils Reimer



Abbildung 37 Frostblumen auf dünnem Eis (dunkles Nilas),

beobachtet während der Erprobungsfahrt. Bei den helleren Bereichen im Ausschnitt der COSMO SkyMed-Aufnahme kann es sich sowohl um aufgepresstes Eis, als auch um dünnes, mit Frostblumen bedecktes Eis handeln.

#### Zu bestimmende Eigenschaften des Meereises

Aus dem Anwendungsbereich Schifffahrt ergeben sich als zu bestimmende Eisparameter im Wesentlichen die relevanten Parameter Eiskonzentration und Deformation (insbesondere Strukturen wie Presseisrücken und Rinnen, aber auch Deformationen im Eisfeld, wie aufgepresstes / übereinander geschobenes Eis). Darüber hinaus sollte eine Bestimmbarkeit von Schollengrößen sowie eine Differenzierung zwischen einjährigem und mehrjährigem Eis erreicht werden. Zu erwarten ist hier eine Limitierung des Verfahrens im Hinblick auf eine Mindestgröße der Schollen bedingt durch die räumliche Auflösung der verwendeten SAR-Daten. Eisdicken, die für eine Beurteilung der Schifffahrtsverhältnisse in eisbedeckten Gewässern ebenfalls sehr wichtig sind, lassen sich aus den hier verwendeten SAR-Daten nicht direkt ableiten.

#### Klassifikationsablauf

Unter Berücksichtigung der Auswahl von Trainingsgebieten zur Parametrisierung der Klassifikatoren und zur Überprüfung der Klassifikationsergebnisse sollte sich eine erste Klasseneinteilung an der Definition der Eisklassen aus den manuell erstellten Eiskarten orientieren. Neben der Eiskonzentration (<1/10, 1-3/10, 4-6/10, 7-8/10, 9-10/10, Neueis, Ebenes Eis, Festeis) soll aufbauend auf die Klassifikation das Auftreten von übereinander geschobenem Eis, Presseishügeln, aufgepresstem Eis, festgestampftem Eis und Rissen/Spalten untersucht werden. Der Versuch, entsprechende Korrelationen zwischen Eiskonzentration und Texturwerten zu finden erscheint zwar zunächst methodisch folgerichtiger als eine Klassifikation mit vordefinierter Klasseneinteilung in Intervallen der Eiskonzentration, wurde aber aufgrund von Mehrdeutigkeiten in den Daten schnell aufgegeben.

Die Automatisierung der Klassifikation erfordert eine Berücksichtigung der sich ändernden Bedingungen bei multitemporalen Aufnahmen. Hierzu sollten in einer



Gefördert durch:  
 Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie  
aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Entwicklung und Erprobung eines gekoppelten  
Eisvorhersage- und Routenoptimierungssystems

Förderkennzeichen: 03SX328A

31. März 2015

Hamburgische Schiffbau-  
Versuchsanstalt GmbH

Nils Reimer

ersten Testphase für einzelne Klassen (z.B. Wasserflächen mit windabhängiger Oberflächenrauigkeit) bzw. Klassifikationsschritte Gruppen von Trainingsdatensätzen definiert werden. Bei optimaler Merkmalsauswahl (insbesondere der Wahl invarianter Merkmale, z.B. Textur-Parameter) könnte eine teilweise zeitliche und räumliche Übertragbarkeit des Klassifikationsregelwerkes erreicht werden.

Die derzeitige Modellauflösung im IRO-2 Projekt liegt bei 5 km X 5 km, somit sollte die Bestimmung der Eiskonzentration mit der deutlich höheren Auflösung der ASAR WSM-Daten problemlos umsetzbar sein, wobei durch den objektorientierten Ansatz (Bildsegmentierung bei voller Auflösung der SAR-Daten) eine deutlich höhere Auflösung des Klassifikationsergebnisses zu erwarten ist.

#### Bestimmung der Eiskonzentration

Zahlreiche der bereits beschriebenen Eigenschaften und Sonderfälle insbesondere bei Eis- und Wasseroberflächen führen dazu, dass eine Eiskonzentrationsbestimmung auf Grundlage von Texturwerten nicht mit ausreichender Genauigkeit allgemein gültig möglich ist. Dies führte zu der Schlussfolgerung, dass zusätzliche Daten notwendig sind. Eiskonzentrationen, die aus passiven Mikrowellendaten bestimmt werden, stellen hier die interessanteste und am einfachsten realisierbare Möglichkeit dar. Daher wurde im weiteren Verlauf auf diese Daten zugegriffen. Die Werte der Eiskonzentrationen der Segmente wurden durch Bildung des Mittelwertes der AMSR2 bzw. SSM/I-Eiskonzentrationen derselben Fläche bestimmt, wobei hier noch Möglichkeiten der Verbesserung der Vorgehensweise gegeben sind (evtl. Verwendung des Median/Modalwertes der AMSR2/SSM/I-Eiskonzentrationen). Als Ergebnis steht nun ein segmentiertes SAR-Bild mit Werten der Eiskonzentration für die einzelnen Bildregionen für die weitere Klassifikation zur Verfügung.

#### Kantendetektion

Zur Detektion von Deformationen des Eises sollte vorläufig eine Kantendetektion nach der Canny-Methode dienen. Im Vergleich zu anderen Verfahren der Kantendetektion (z.B. Laplace, Sobel, Prewitt und Roberts-Filter) ist aufgrund der geringeren Rauschanfälligkeit das beste Ergebnis zu erwarten. Der Canny-Algorithmus nutzt den Sobel-Operator als Kantendetektor und bietet sowohl die Möglichkeit zur Kantenverfolgung (von Kanten die mit geringerem Gradienten als dem Schwellenwert zur Detektion weiterlaufen) als auch zur Hysterese („Ausdünnen“) der erkannten Linien und damit zur Verhinderung einer Mehrfachantwort auf dasselbe Signal. Das Auftreten von Kanten im Allgemeinen, aber auch abgeleitete Maße wie die Kantendichte innerhalb eines Rasterfeldes oder Segmentes, könnten ggf. zur Verbesserung der Klassifikationsergebnisse



Gefördert durch:  
 Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie  
aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Entwicklung und Erprobung eines gekoppelten  
Eisvorhersage- und Routenoptimierungssystems

Förderkennzeichen: 03SX328A

31. März 2015

Hamburgische Schiffbau-  
Versuchsanstalt GmbH

Nils Reimer

oder zur Unterstützung bei der Detektion linearer Strukturen, wie Presseishügeln und Rinnen, dienen. Das hohe Rauschen in den Bilddaten sowie insbesondere die variierende Breite und Ausdehnung der gesuchten Merkmale erschwert diese Vorgehensweise. Kantendetektion kann jedoch (z.B. bei der Berechnung der Dichte von detektierten Kanten in einem vordefinierten Bildausschnitt / auf Grundlage bereits bestehender Segmente) als zusätzliches Merkmal zur Klassifikation dienen.

#### Detektion von Rinnen

Wichtigstes Klassifikationsmerkmal zur Detektion von Rinnen und Rissen ist die Form der Bildsegmente. Da es sich um linienförmige Objekte in den Bilddaten handelt, wurde hier das Verhältnis von Länge zu Breite der Segmente herangezogen. Des Weiteren erscheinen Rinnen in den SAR-Daten dunkler als das umgebende Eis, als zweites wichtiges Klassifikationsmerkmal kann somit die Rückstreuintensität relativ zur lokalen Umgebung betrachtet werden.

#### Detektion von Deformationen

Ist die Eiskonzentration der betreffenden Flächen bereits bekannt, lässt die Rückstreuintensität des Radars Rückschlüsse auf den Deformationsgrad des Eises bei (beinahe) geschlossenen Eisdecken zu, da die Oberflächenrauigkeit hier im Wesentlichen durch Deformationen des Eises – wie Presseishügel, übereinander geschobenes Eis und aufgepresstes Eis – begründet ist. Ebenso ist eine Trennbarkeit von einjährigem und mehrjährigem Eis bis zu einem gewissen Grade möglich. Mehrjähriges Eis besitzt i.d.R. eine glattere Oberfläche, die durch wiederholtes Schmelzen und Gefrieren der Oberfläche entsteht.

#### Bestimmung von Flächengrößen

Die Anwendbarkeit objektorientierter Bildverarbeitungstechniken zur Bestimmung von Flächengrößen, z.B. der Größe einzelner Schollen, sollte aufgrund der Datenqualität, insbesondere dem hohen Rauschen, eingeschränkt sein. Die Qualität des Segmentierungsergebnisses reicht somit nicht aus, um einzelne große Schollen sicher zu identifizieren. Möglich ist aber eine statistische Betrachtung von Schollengrößen unter Angabe der möglichen Fehler.

#### Klassifikatorauswahl

Bei den Klassifikationsalgorithmen werden sowohl überwachte als auch unüberwachte Verfahren untersucht. Während überwachte Verfahren Trainingsdaten nutzen, um daraus eine Zugehörigkeit für jeden Pixel im Bilddatensatz abzuleiten, handelt es sich bei unüberwachten Verfahren um eine statistische Auswertung der Bildeigenschaften ohne a-priori Informationen. Diese Clusteranalyse kann auch als Vorverarbeitungsschritt zur überwachten Klassifikation genutzt werden. Von den Klassifikationsalgorithmen in der





Gefördert durch:  
 Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie  
aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Entwicklung und Erprobung eines gekoppelten  
Eisvorhersage- und Routenoptimierungssystems

Förderkennzeichen: 03SX328A

31. März 2015

Hamburgische Schiffbau-  
Versuchsanstalt GmbH

Nils Reimer

Fernerkundung wurden mehrere näher auf Ihre Verwendbarkeit hinsichtlich der Unterscheidung von Eisklassen untersucht: ein Nearest Neighbour-Verfahren, ein Maximum-Likelihood-Klassifikator sowie Support Vector Machines und Fuzzy Logic. Die hier durchgeführte hierarchische Klassifikation erlaubt auch die Verwendung unterschiedlicher Klassifikatoren für die einzelnen Bearbeitungsschritte. Insgesamt ist die Klassifikatorauswahl aber weniger entscheidend im Vergleich zur Sicherstellung der Separierbarkeit der Klassen im Merkmalsraum.

#### Klassifikationsgüte und Genauigkeitsbestimmung

Zur Beschreibung der Klassifikationsgüte dient im Allgemeinen eine Konfusionsmatrix. Problematisch hierbei ist vor allem, dass die Einschätzung der Genauigkeit lediglich binär erfolgt, neben richtig oder falsch klassifiziert lassen sich so keine weiteren Aussagen, beispielsweise über den Grad der Abweichung, treffen. Das wesentliche Problem hierbei ist aber die Verfügbarkeit von „ground truth“ - Daten. Zum einen könnten die Informationen aus manuell erstellten Eiskarten genutzt werden; diese basieren aber i.d.R. auf derselben Datenquelle wie die Klassifikation und enthalten zu einem hohen Maß eine subjektive Interpretation der Daten, was die Aussagekraft eines solchen Vergleichs deutlich einschränkt. Als zweite Möglichkeit stehen direkte Eisbeobachtungen, z.B. während der Validationsfahrt, zur Verfügung. Problematisch hierbei ist zum einen die räumliche Dynamik des Meereises, so dass nur zeitnah zum Aufnahmezeitpunkt der SAR-Daten erstellte Beobachtungen effektiv genutzt werden können. Die Nutzung eines täglichen Datensatzes von Eisbeobachtungen würde eine räumliche Rückverfolgung der beobachteten Eisbedingungen unter Berücksichtigung der Eisdrift erfordern.

#### ECDIS konforme Darstellung / S-411

Im Rahmen von IRO-2 wurde am BSH ein Verfahren entwickelt, um die Ausgabe des numerischen Vorhersagemodells in vektorbasierte und ECDIS konforme Eiskarten umzuwandeln. Es bestand aber die Schwierigkeit, dass der internationale Standard für Eisinformationen (S-411) erst 2014 fertiggestellt wurde, und so es noch kein ECDIS gibt, welche diese Informationen darstellen konnte. Bei der Forschungsfahrt wurden daher die Vorhersagekarten nicht in S-411 sondern als komprimierte Griddaten an Bord von Lance gesendet. Durch die relativ grobe Modellauflösung waren die notwendigen Datenmengen dabei klein genug und auch vergleichbar mit denen, die eine vektorbasierte Karte gebraucht hätten. An Bord konnten die Daten dann entkomprimiert und sowohl in Vektorform für GIS Systeme als auch in Geotiffs umgewandelt werden. Die Geotiffs konnten dann auch auf einem ECDIS dargestellt werden.



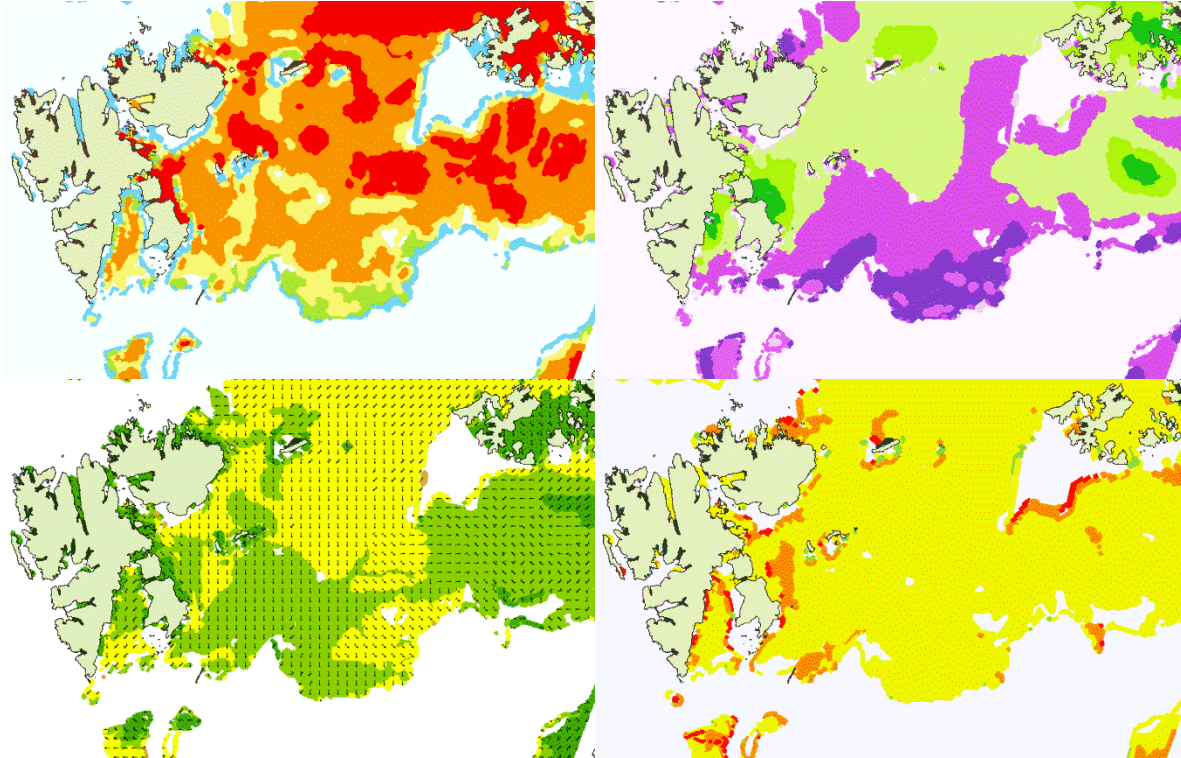


Abbildung 38 Visualisierung der Eisinformationen in geotif Dateien zur Darstellung an Bord (Eiskonzentration, Entwicklungszustand Eisdrift und Konvergenz)

### Festeis

Findet man in der Arktis entlang des russischen und kanadischen Schelfs teilweise Festeis, welches sich bis auf über 100km vom eigentlichen Festland erstreckt, so kommt im Untersuchungsgebiet von IRO-2 östlich Spitzbergens nur in sehr kleinen Gebieten Festeis vor, wobei das Festeis sich außerdem hauptsächlich sehr nahe der Küste, bzw. in schmalen Fjorden befindet. In den nautischen Publikationen wird das Festeisvorkommen unterschiedlich beschrieben. Die amerikanischen Publikationen sprechen von starker Festeisbildung und Festeisvorkommen im Gebiet nördlich und östlich von Spitzbergen<sup>3</sup>. Im Gegensatz dazu findet man in den norwegischen Seehandbüchern (erhältlich unter <http://kartverket.no/en/Kart/Nautical-Publications/The-Norwegian-Pilot-Guide/>) Karten in denen zwar rund um Grönland Festeis eingezeichnet ist, in denselben Karten ist im Gebiet um Svalbard so gut wie kein Festeis vorhanden. Auf den aktuellen operationellen norwegischen Eiskarten findet man in den Wintermonaten aber entlang der

<sup>3</sup> („Svalbard experiences heavy fast ice Formation long it's N an E Coasts during the winter, ...“, auf Seite 14 in Pub.180 Sailing directions Arctic Ocean, erhältlich unter [http://msi.nga.mil/MSISiteContent/StaticFiles/NAV\\_PUBS/SD/Pub180/Pub180bk.pdf](http://msi.nga.mil/MSISiteContent/StaticFiles/NAV_PUBS/SD/Pub180/Pub180bk.pdf) )



Gefördert durch:  
 Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie  
aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Entwicklung und Erprobung eines gekoppelten  
Eisvorhersage- und Routenoptimierungssystems

Förderkennzeichen: 03SX328A

31. März 2015

Hamburgische Schiffbau-  
Versuchsanstalt GmbH

Nils Reimer

Küsten und in Fjorden Festeis eingetragen. In ähnlicher Weise findet man auch Festeis zwischen den einzelnen Inseln von Franz-Josef-Land.

### Fazit und Ausblick

Wir stehen noch ziemlich am Anfang auf unserem Weg zu einer weitestgehend automatischen Klassifikation von Meereis. Auch Arbeiten anderer Forschungsgruppen zeigen deutlich, dass eine Umsetzung eines solchen Vorhabens mit den gegebenen Mitteln nicht in einer Form möglich ist, die die Qualität der von Eisanalysten manuell erstellten Eiskarten erreicht.

Dennoch kann die entwickelte Vorgehensweise Ergebnisse liefern, die sowohl zur Assimilation in ein Vorhersagemodell, als auch zur Unterstützung der Arbeit der Eisanalysten eingesetzt werden können. Es ist somit abzusehen, dass eine vollautomatische Klassifikation von Meereis unter Berücksichtigung der vielen möglichen Entwicklungsstadien, Konzentrationen und Deformationsformen von Meereis nicht erreichbar ist, insbesondere nicht auf Grundlage der uns bisher zur Verfügung stehenden, einfach polarisierten SAR-Daten. Dazu gibt es in den Daten zu viele Mehrdeutigkeiten, beispielsweise Windeffekte über offenem Wasser. Die erforderliche zusätzliche manuelle Arbeit bei der Auswertung solcher Daten kann aber auf ein Minimum reduziert werden.

Die entwickelten Algorithmen sowie deren Verknüpfungen bieten dabei noch erhebliches Potential zur Verbesserung bzw. Weiterentwicklung, insbesondere bei der Feinabstimmung zwischen Bildsegmentierung und Texturwerten. Ein interessanter Bereich dabei ist die Beseitigung bestehender Ungenauigkeiten in den Klassifikationsergebnissen durch Verwendung weiterer zusätzlicher Daten sowie Rückkopplungen mit dem Modellsystem. Zukünftige Entwicklungen sollten den Fokus auf solche Details legen, die in SAR-Daten eindeutig identifizierbar sind, nicht jedoch in passiven Mikrowellendaten. Während Eiskonzentrationen aus passiven Mikrowellendaten wohl für die Assimilation in das Modell in ausreichender Genauigkeit vorliegen, sind detaillierte Strukturinformationen, z.B. über die Existenz von Rinnen und Presseisrücken, nur aus SAR-Daten zu gewinnen. Dazu müssten diese Informationen aber auch im Modell vorliegen.

Durch den Ausfall des Satelliten ENVISAT wurde deutlich, dass eine Übertragbarkeit von Klassifikationsansätzen stets berücksichtigt werden muss. Dies wurde hier gewährleistet: im Vergleich zur texturbasierten Klassifikation waren bei Verwendung anderer Datenquellen nur geringfügige Anpassungen notwendig, sofern die räumliche Auflösung der Aufnahmesysteme vergleichbar ist.



Gefördert durch:  
 Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie  
aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Entwicklung und Erprobung eines gekoppelten  
Eisvorhersage- und Routenoptimierungssystems

Förderkennzeichen: 03SX328A

31. März 2015

Hamburgische Schiffbau-  
Versuchsanstalt GmbH

Nils Reimer

### **2.1.6 AP6 Erprobung des Prototypen mit Forschungsschiff Lance**

Im März 2014 wurde der entwickelte Prototyp des Eisvorhersage- und Routenoptimierungssystems auf einer 14 tägigen Kampagne auf dem norwegischen Forschungsschiff RV Lance in der Barentssee im Einsatz erprobt.

Der Prototyp des regionalen Eisvorhersagemodells beschränkte sich dabei auf das in Kapitel 2.1.3 beschriebene Gebiet. Das Eisvorhersagemodell wurde bereits vor Beginn der Fahrt kontinuierlich betrieben, so dass bereits im Vorwege ein Vergleich zwischen Vorhersage und beobachteten Eisverhältnissen möglich war.

Die Dauer der Erprobungsfahrt betrug 14 Tage, das Schiff startete am 15.03.2014 von Loneyarbyn aus und traf am 17.03.2014 hinter der Südspitze von Spitzbergen auf das erste Eis. Die Zeit während des Transits in das Erprobungsgebiet östlich von Spitzbergen wurde zur Durchführung von CTD Messungen von Bord aus genutzt. Die Ermittlung von Dichte, Temperatur und Leitfähigkeit ist für die Simulation der Strömung in das Modellgebiet von Bedeutung, da diese einen erheblichen Einfluss auf die Entstehung des Eises haben kann.

Insgesamt konnten während der Erprobungsfahrt 10 Routen abgefahren werden. Hierzu wurden gewünschter Start und Endpunkt von Bord aus nach Hamburg übermittelt, wo unter Einbeziehung der aktuellen Modellausgabe der Eisvorhersage zunächst die Fahrzeit auf der kürzesten Route berechnet wurde. Anschließend wurden von der Routenoptimierung mehrere Alternativvorschläge erzeugt, berechnet und anschließend wieder an Bord zurück geschickt. Hier konnte das IRO-2 Team gemeinsam mit der Schiffsführung die Routenvorschläge gemeinsam mit den ebenfalls an Bord übermittelten Eisinformationen diskutieren und eine Auswahl für die Routenoption treffen. Diese Auswahl wurde anschließend in die bordeigene ECDIS Einheit eingegeben.



Gefördert durch:  
 Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie  
aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

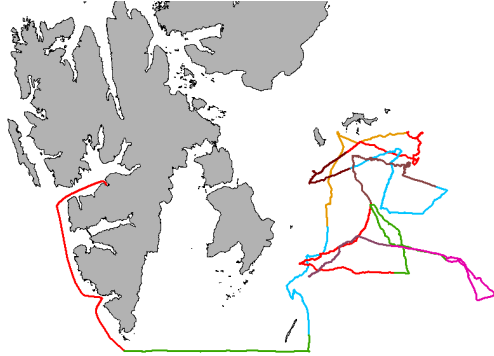
## Entwicklung und Erprobung eines gekoppelten Eisvorhersage- und Routenoptimierungssystems

Förderkennzeichen: 03SX328A

31. März 2015

Hamburgische Schiffbau-  
Versuchsanstalt GmbH

Nils Reimer



Ice Class	DNV IA
Länge ü. Alles	60.8m
Lpp	52.2m
Breite	12.6m
Tiefgang	5.5m
Verdrängung	2230t
Hauptmaschine	MAK 453, 2386kW

Abbildung 39 Fahrtverlauf östlich von Spitzbergen (links), technische Daten RV Lance (rechts)

Zur Beurteilung der Funktionalität des Systems wurden die wichtigsten Eis- Ozean- und Wetterbedingungen während der Fahrt durch Beobachtungen und Messungen rund um die Uhr erfasst. Zur Bestimmung der Eisdicke stand ein auf elektro-magnetischer Induktion basierender Sensor EM31 zur Verfügung. Dieser wurde am Forecastledeck des Schiffes an einem Kragträger befestigt, so dass die Dicke des ungebrochenen Eises direkt vor dem Bug mit einer Abtastrate von 2 Hz aufgezeichnet wurde. Das EM31 misst dabei in Kombination mit einem Ultraschallsensor die Gesamtdicke bestehend aus Eis und Schneeauflage.





Abbildung 40 Typische Eisformationen während der Erprobungsfahrt

Die Eisverhältnisse im Erprobungsgebiet waren gekennzeichnet von dickem, teilweise aufgepresstem Eis, das in der nördlichen Hälfte vor allem um Kong Karls Land vorzufinden war und loserem Drifteis in der mittleren und südlichen Region. Im Laufe der Kampagne drifteten immer mehr dickere Eisfragmente von Norden Richtung Süden. Diese wurden aufgrund sinkender Temperaturen zusätzlich von neuem Eis umschlossen, so dass das Schiff mit einer verfügbaren Antriebsleistung von nur 1700kW in seinem Aktionsradius eingeschränkt war. Die Routen wurden daher in der zweiten Hälfte der Kampagne eher im südöstlichen Bereich angelegt.

Für die Erprobung des Systems standen folgende Hauptziele im Fokus:

- Funktionalität des Gesamtsystems unter operationellen Bedingungen
- Vergleich der Eisvorhersage mit den angetroffenen Eisverhältnissen
- Vergleich der erreichbaren Schiffsgeschwindigkeit mit der Prognose
- Evaluation der vorgeschlagenen Routen
- Akzeptanz der Eisroutenoptimierung durch die Schiffsführung



Gefördert durch:  
Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie  
aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

## Entwicklung und Erprobung eines gekoppelten Eisvorhersage- und Routenoptimierungssystems

Förderkennzeichen: 03SX328A

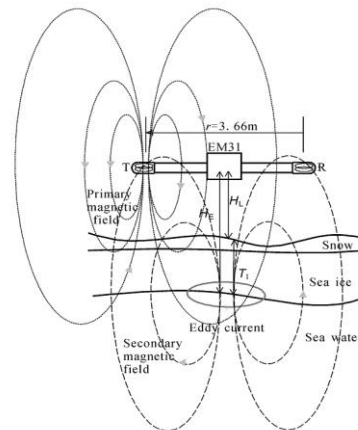
31. März 2015

Hamburgische Schiffbau-  
Versuchsanstalt GmbH

Nils Reimer

Zum Vergleich der Eisverhältnisse mit den vorhergesagten Daten aus dem regionalen Modell wurden sowohl Beobachtungen als auch Messungen mit einem elektro-magnetischem Induktionssensor (EM31) durchgeführt. Die Beobachtungen wurden rund um die Uhr in Teams durchgeführt wobei sowohl die Eissituation in der weiteren Umgebung (Sichtbereich) als auch die Eisdicke und Konzentration unmittelbar ums Schiff herum erfasst wurden. Die Eisparameter am Schiff wurden im 2 Minuten Takt aufgezeichnet und konnten gemeinsam mit den Eisdickenwerten des EM31 zur Auswertung der tatsächlich erreichten Eisbrechfähigkeit herangezogen werden.

Die Beobachtungen durch die Teams beschränkten sich dabei auf die Eiskonzentration, Schollengröße sowie Eis- und Schneedicke um das Schiff herum. Unterstützt wurden diese Beobachtungen von regelmäßigen Fotoaufnahmen aus unterschiedlichen Blickwinkeln.



CECAM - Lance 2014-03-18 05:14:18



Abbildung 41 Eisdickenmessung mit dem EM31 (oben), Eisbeobachtungen (unten)





Gefördert durch:  
  
 Bundesministerium  
 für Wirtschaft  
 und Energie  
 aufgrund eines Beschlusses  
 des Deutschen Bundestages

Entwicklung und Erprobung eines gekoppelten  
 Eisvorhersage- und Routenoptimierungssystems

Förderkennzeichen: 03SX328A

31. März 2015

Hamburgische Schiffbau-  
 Versuchsanstalt GmbH

Nils Reimer

Ein weiteres Team führte Beobachtungen im weiteren Sichtbereich um das Schiff herum durch. Die Ergebnisse dieser Beobachtungen sind in Tabelle 4 und 5 zusammengefasst. Anhand der Übersicht lässt sich die Entwicklung von steigender Eiskonzentration und Dicke im Fahrtgebiet in der zweiten Hälfte der Fahrt deutlich ablesen.

Tabelle 4 Beobachtete Eiskonzentration über den Fahrtverlauf

2014-03	17.	18.	19.	20.	21.	22.	23.	24.	25.	26.	27.	sum	%
number of obs. during active ice navigation	55	65	58	40	57	47	61	44	55	43	20	545	100
ice concentration													
>0/10	1	4	8	0	0	0	1	1	0	1	0	16	2,9
1/10	2	7	2	0	0	0	0	0	0	0	1	12	2,2
2/10	4	1	2	0	0	0	1	0	0	1	1	10	1,8
3/10	5	0	2	0	0	0	0	0	1	1	0	9	1,7
4/10	2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	4	0,7
5/10	7	1	5	0	0	0	0	2	2	1	2	20	3,7
6/10	0	3	2	0	0	0	0	0	0	0	1	6	1,1
7/10	3	2	1	1	0	0	1	2	2	2	1	15	2,8
8/10	8	18	13	3	2	1	1	3	4	6	6	65	12,0
9/10	14	16	11	7	15	16	13	12	23	12	3	142	26,2
9+/10	8	12	10	3	22	27	31	18	18	18	4	171	31,5
10/10	1	1	1	26	18	3	13	6	5	1	0	75	13,8

Tabelle 5 Beobachteter Entwicklungszustand des Eises über den Fahrtverlauf

2014-03	17.	18.	19.	20.	21.	22.	23.	24.	25.	26.	27.	sum	%
number of obs. during active ice navigation	55	65	58	40	57	47	61	44	55	43	20	545	
1 - new ice $\sum 10^{\text{th}}$	22	21	41	3	28	4	21	35	3	2	0	180	4,1
number of obs.	6	11	14	3	9	1	10	12	3	2	0		
2 - nilas $\sum 10^{\text{th}}$	11	85	73	105	110	88	123	93	92	58	0	838	19,0
number of obs.	3	21	14	31	30	42	46	34	33	26	0		
3 - 10-30 cm $\sum 10^{\text{th}}$	2	27	7	28	170	110	69	99	28	49	35	624	14,2
number of obs.	1	3	2	5	20	24	11	18	6	15	15		
4 - 10-15 cm $\sum 10^{\text{th}}$	187	130	40	59	67	61	78	41	61	64	2	790	18,0
number of obs.	40	24	15	13	11	13	21	9	18	13	1		
5 - 15-30 cm $\sum 10^{\text{th}}$	96	155	109	61	74	56	216	92	205	102	3	1169	26,5
number of obs.	20	30	17	14	15	7	39	14	34	16	2		
7 - 30-70 cm $\sum 10^{\text{th}}$	0	0	0	7	0	0	0	0	0	35	101	143	3,2
number of obs.	0	0	2	0	0	0	0	0	0	8	17		
8 - 30-50 cm $\sum 10^{\text{th}}$	27	39	101	91	71	88	44	26	82	45	0	614	13,9
number of obs.	5	10	15	15	13	20	11	8	15	11	0		
9 - 50-70 cm $\sum 10^{\text{th}}$	0	0	0	30	0	19	0	0	0	0	0	49	1,1
number of obs.	0	0	0	6	0	3	0	0	0	0	0		
<b>Total <math>\sum 10^{\text{th}}</math></b>												<b>4407</b>	

Neben den Eiskenngrößen wurden zahlreiche weitere meteorologische Daten wie Lufttemperatur und Feuchte, Wolkenbedeckung, Oberflächentemperatur des Wassers / Eises, Windstärke und Richtung von Bord aus erhoben (Abbildung 39). Darüber hinaus wurde das WAMOS Wellenradarsystem eingesetzt um Wellenhöhen zu ermitteln. Das System ist auch in der Lage die Rauigkeiten von eisbedeckten Oberflächen zu erfassen.

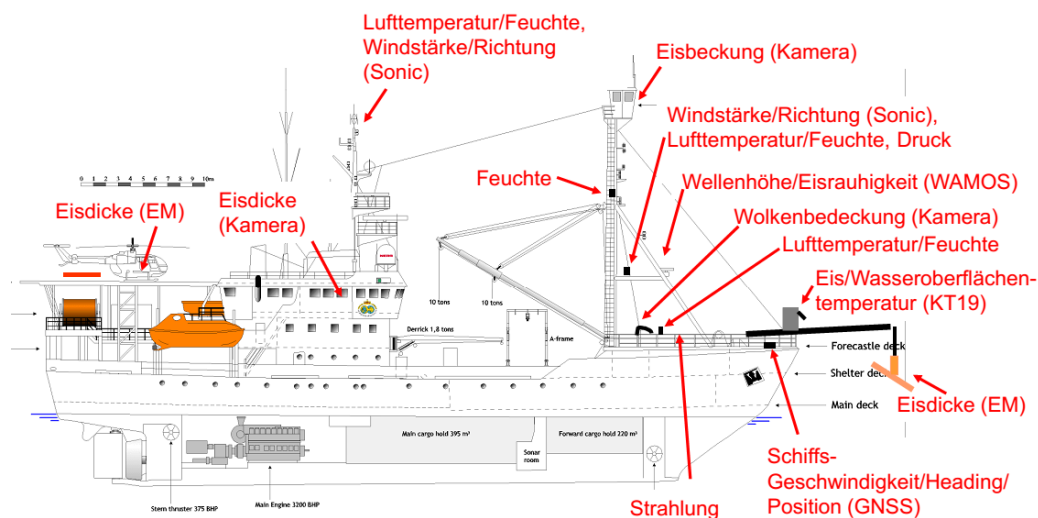


Abbildung 42 Von Bord aus durchgeführte Messungen während der Erprobungsfahrt [24]

### Eis und SAR-Daten auf der Erprobungsfahrt

Im Zeitraum vom 17. – 27.03.2014 fand eine Validationsfahrt mit R/V Lance in der Barentssee statt. Dabei wurden wichtige „Ground Truth-Daten“ gesammelt, die zur Überprüfung der entwickelten Eisklassifizierung genutzt werden können. In diesem Teilbereich am relevantesten sind dabei die Eisbeobachtungen sowie die EM-Messungen der Eisdicken. Auf eine detaillierte Beschreibung der Eis- und Witterungsverhältnisse vor und während der Validationsfahrt wird hier verzichtet, da es hierzu spezielle Berichte gibt. Die aufgenommenen Eisdaten wurden weiterverarbeitet und es wurden entsprechende Shape-Files erstellt, welche die Nutzung zur Überprüfung der Genauigkeit der SAR-Klassifikation ermöglichen. Während der Validationsfahrt wurden 19 SAR-Aufnahmen der Satelliten RADARSAT-2 und COSMO-SkyMed in unterschiedlichen Aufnahmemodi und Polarisierungen bestellt. Die Daten wurden in near-real-time prozessiert und dem Projektteam an Land zur Verfügung gestellt. Aufgrund der Dateigrößen der SAR-Daten war das Senden einer kompletten Szene an R/V Lance über IRIDIUM-Verbindung nicht möglich; einige Ausschnitte wurden jedoch via E-Mail verschickt, um den Projektmitarbeitern an Bord zusätzliche Informationen über die aktuelle Eislage, die über die Ergebnisse des IRO-Modells hinausgehen, bereitzustellen.



Gefördert durch:  
 Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie  
aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Entwicklung und Erprobung eines gekoppelten  
Eisvorhersage- und Routenoptimierungssystems

Förderkennzeichen: 03SX328A

31. März 2015

Hamburgische Schiffbau-  
Versuchsanstalt GmbH

Nils Reimer

In der Vorhabenbeschreibung des BSH zum Projekt IRO-2 waren zur Beschaffung von SAR-Daten 60.000 € vorgesehen. Aufgrund des Ausfalls des ENVISAT-Satelliten wurde dieses Budget zur Unterstützung der Validationsfahrt für eine Datenbeschaffung im März 2014 reserviert. Dies erschien sinnvoll, da mit den während der Validationsfahrt gesammelten Beobachtungsdaten ausreichend „Ground Truth“-Informationen zur nachträglichen Überprüfung der Klassifikation der SAR-Daten zur Verfügung stand. Nachteilig war hierbei vor allem, dass die Funktionsfähigkeit der entwickelten Algorithmen mit den SAR-Daten dieser Aufnahmesysteme im Vorfeld nur sehr eingeschränkt getestet werden konnte.

Über das vorgesehene Budget hinaus wurden über eine Ausschreibung zur wissenschaftlichen Nutzung von COSMO-SkyMed zusätzliche Daten beschafft. Die aufgeführten 10 Aufnahmen dieses Satellitensystems wurden daher für das Projekt kostenlos zur Verfügung gestellt.

Bei der Bestellung der SAR-Daten wurde berücksichtigt, unterschiedliche Aufnahmemodi unterschiedlicher SAR-Systeme abzudecken, insbesondere um eine Übertragbarkeit des entwickelten Verfahrens zu testen. Die COSMO-SkyMed Daten sind einfach polarisierte X-Band SAR-Daten, welche im ScanSAR Hugel bzw. Stripmap Himage-Modus aufgenommen wurden. Die räumlich hochaufgelösten Stripmap Himage-Daten sollten dabei genutzt werden, um die Zusatzinformation, die aus einer höheren räumlichen Auflösung gewonnen werden kann, zu bewerten. Die RADARSAT-2 Daten wurden im ScanSAR Wide und Wide Fine-Modus aufgenommen; hierbei wurden dual-polarisierte Daten bestellt. Die Daten dieses Aufnahmesystems wurden vor allem deswegen ausgewählt, da der RADARSAT-2-Sensor am ehesten mit jenem des neuen ESA-Satelliten Sentinel-1 vergleichbar ist (Nutzung des C-Bandes, räumliche Auflösung, HH/HV Polarisationsmodi). Die Übertragbarkeit einer entwickelten SAR-Klassifikation kann also am ehesten bei einer Weiterentwicklung des Verfahrens auf dieser Datengrundlage erreicht werden.

Die erhaltenen Daten der SAR-Aufnahmesysteme COSMO-SkyMed und RADARSAT-2 sowie die von der Universität Hamburg bezogenen TerraSAR-X-Daten stellen aufgrund der hohen Kosten für SAR-Aufnahmen dieser Sensoren und der Anzahl an benötigten Daten jedoch keine wirtschaftlich sinnvolle Alternative für den operationellen Betrieb dar, obwohl die Qualität der Daten insgesamt als sehr gut beurteilt werden kann. Gerade deswegen ist die zukünftige freie Verfügbarkeit von Sentinel-1-Daten sowohl für die IRO-2-Ergebnisse als auch für die Arbeit des Eisdienstes sehr interessant. Inzwischen sind die ersten Daten dieses Sensors verfügbar (Stand: 11/2014). Neben Sentinel 1A ist für 2016 der Start von Sentinel 1B geplant. Dieses zweite (identische) System wird die zeitliche Auflösung gerade in den Polargebieten weiter erhöhen und ist somit für das Monitoring von Meereis optimal geeignet.

### Bewertung des Systems

Die geringe Eisbrechfähigkeit von RV Lance führte von Beginn an zu einer zusätzlichen Einschränkung des nutzbaren Testgebiets. Die vorgeschlagenen Routen überschritten daher selten eine Distanz von 100 Seemeilen mit Ausnahme einer Route zum Ende der Fahrt mit 190 Seemeilen. Auf diesen relativ kurzen Routen hatte die Wirkung deformierten Eises einen hohen Einfluss auf die Gesamtfahrtdauer. Die Mittelung der Eisdicke und Eiskonzentration kann hier zu größeren Abweichungen der Fahrtzeitpoggnose führen, da wenige Begegnungen mit schwerem Eis das Ergebnis verzerren können.

Die Beobachtungen der Eisverhältnisse von Bord aus geben darüber hinaus keinen repräsentativen Vergleich mit den Modellausgaben für eine Gitterzelle von 5x5 km<sup>2</sup> her, da das Schiff nur ausgewählte, schmale Korridore abdeckte.

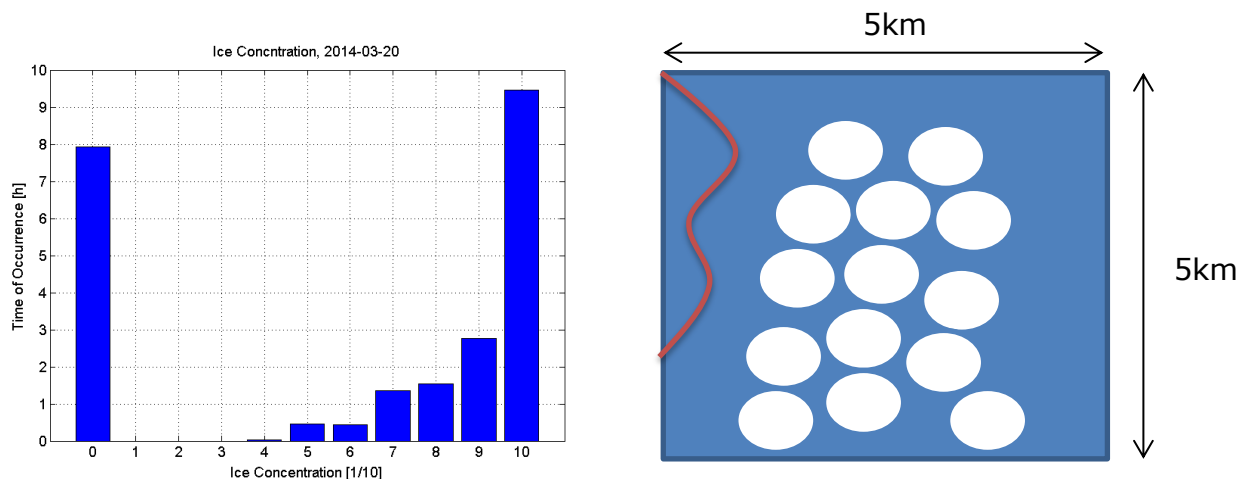


Abbildung 43 Verteilung der Eiskonzentration aus Beobachtung, mangelnde Repräsentativität der Beobachtungen im Vergleich zur Gesamtbedeckung einer Gitterzelle

Die Eisbeobachtungen können aber für die Validierung der erreichbaren Geschwindigkeiten herangezogen werden. Hierzu werden zunächst die Ergebnisse der Beobachtungen mit den Messergebnissen des EM31 verglichen. Eine Auswertung der über drei Minuten bzw. zwei Minuten gemittelten Werte in Abbildung 44 zeigt eine sehr gute Übereinstimmung für Bereiche ebenen Eises und starke Abweichung bei deformiertem Eis. Dies lässt sich daraus erklären, dass bei den Beobachtungen immer nur die Basiseisdicke dokumentiert wurde. Der EM31 Sensor hingegen erfasst die gesamte Dicke des deformierten Eises bei Schichtung oder Aufpressen sofern sich kein Wasser zwischen den einzelnen Eislagen befindet.



Gefördert durch:  
Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie  
aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

## Entwicklung und Erprobung eines gekoppelten Eisvorhersage- und Routenoptimierungssystems

Förderkennzeichen: 03SX328A

31. März 2015

Hamburgische Schiffbau-  
Versuchsanstalt GmbH

Nils Reimer

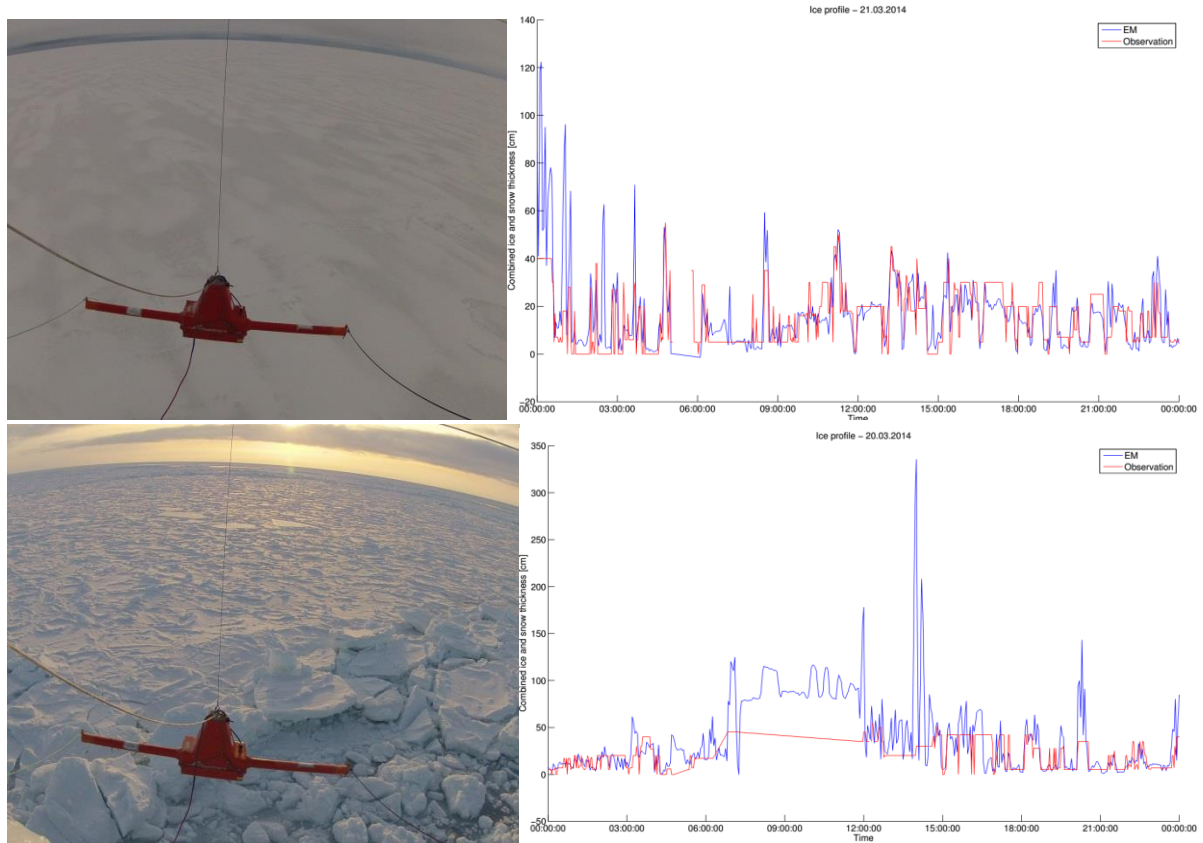


Abbildung 44 Unterschiedlich gute Übereinstimmung der beobachteten und gemessenen Eisdicken für ebenes und deformiertes Eis

In Abbildung 45 sind die prognostizierte Eisbrechfähigkeit und das Ergebnis aus Eisbeobachtung und Aufzeichnung der Schiffsdaten gegenübergestellt. Für den relevanten Bereich zwischen 0 und 70cm Gesamtdicke (Eis + Schnee) zeigt sich eine gute Übereinstimmung der erreichbaren Geschwindigkeit für geschlossenes Eis.



Gefördert durch:  
 Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie  
aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

# Entwicklung und Erprobung eines gekoppelten Eisvorhersage- und Routenoptimierungssystems

Förderkennzeichen: 03SX328A

31. März 2015

Hamburgische Schiffbau-  
Versuchsanstalt GmbH

Nils Reimer

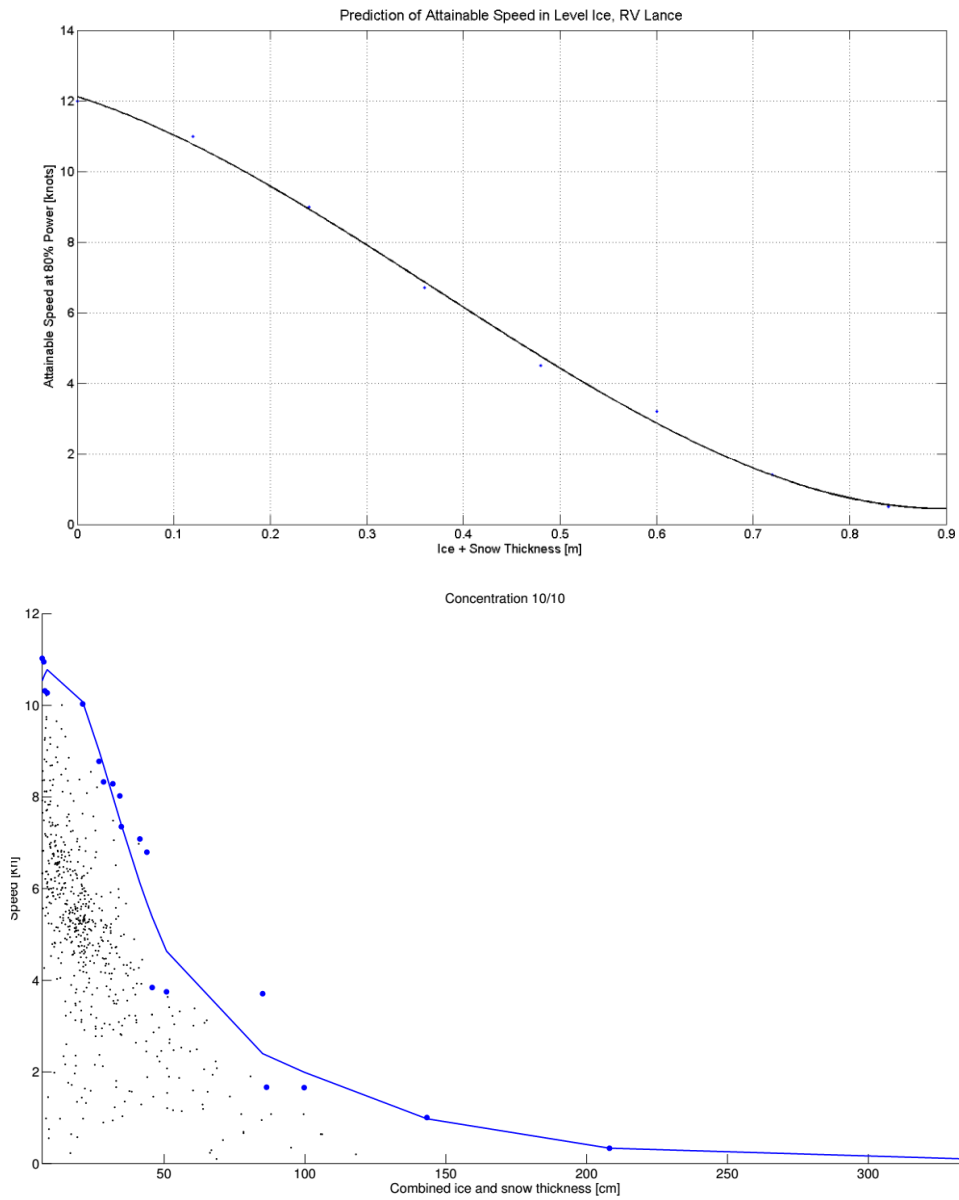


Abbildung 45 Vergleich der Eisbrechfähigkeit aus Prognose und Beobachtung / Messung





Gefördert durch:  
Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie  
aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

## Entwicklung und Erprobung eines gekoppelten Eisvorhersage- und Routenoptimierungssystems

Förderkennzeichen: 03SX328A

31. März 2015

Hamburgische Schiffbau-  
Versuchsanstalt GmbH

Nils Reimer

### Bewertung der Routenoptimierung:

Insgesamt konnten während der Fahrt 12 Routenvorschläge abgefahren werden (Tabelle 6).

Tabelle 6 Abgefahrte Routenvorschläge

Route Option No.	Route	Start Co.	End Co.	ETD [d-h:min]	ETA [d-h:min]	Time [h.min]
1	14317_0600_2	76.33°N/26.16°E	79.00°N/27.50°E	16-20:00	17-20:45	24.45
2	14318_1900_2	78.65°N/28.72°E	80.05°N/32.82°E	18-17:30	19-06:19	13.19
3	14319_1100_1	78.65°N/31.30°E	77.89°N/31.90°E	19-12:00	19-19:15	7.15
4	14319_1500_1	78.51°N/31.83°E	78.34°N/26.34°E	19-17:00	20-03:23	10.23
5	14320_1500_3b	77.70°N/24.50°E	78.34°N/26.34°E	20-22:00	21-06:31	8.31
6	14320_1800_1	78.48°N/26.79°E	77.93°N/29.85°E	20-17:00	21-07:39	13.39
7	14322_0700_1	78.42°N/31.14°E	78.53°N/28.43°E	22-06:00	22-10:45	4.45
8	14322_1300_3	78.53°N/28.43°E	77.33°N/25.17°E	22-14:00	23-05:07	15.07
9	14323_0900_1	77.37°N/25.15°E	78.00°N/29.30°E	23-13:00	24-08:33	19.33
10	14324_1100_2	78.00°N/29.33°E	77.00°N/35.83°E	24-14:00	25-06:06	16.06
11	14324_1300_2	78.00°N/29.33°E	77.00°N/35.83°E	24-14:00	25-08:54	18.54
12	14325_0900_1	77.42°N/34.00°E	76.75°N/20.67°E	25-14:00	26-15:56	25.56

Beispielhaft wird im Folgenden die Route 14322\_1300 genauer betrachtet. Nach Absprache mit der Crew des Schiffes wurde entschieden, eine vom System vorgeschlagene Alternativroute abweichend von der kürzesten Route durch leichtere Eisverhältnisse zu wählen.

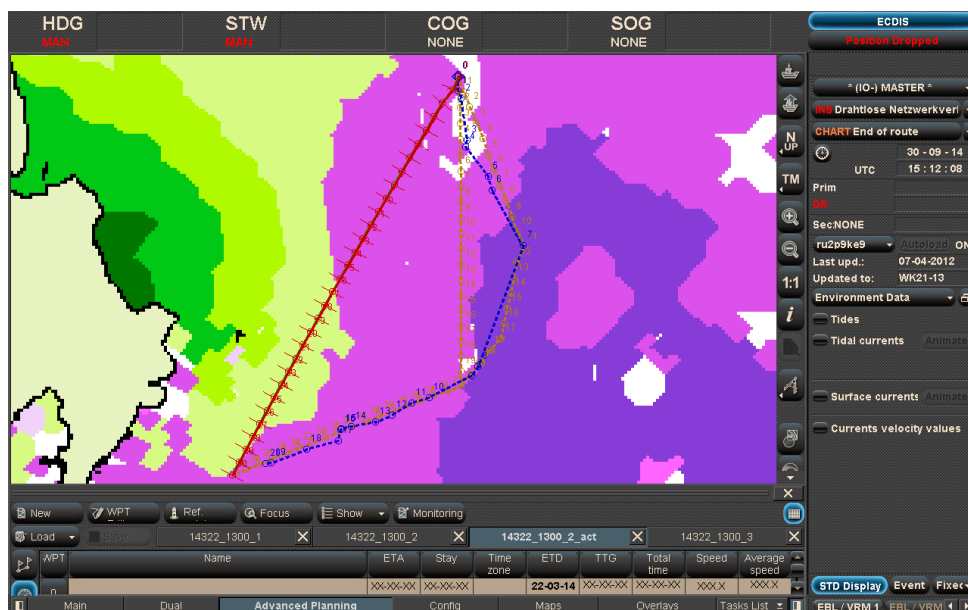


Abbildung 46 Darstellung der Ausgangsrouten sowie zweier Optionen in ENC

Die prognostizierte Fahrtzeit dieser Routenalternative betrug etwa 15h bei einer zusätzlichen Distanz von 23.7 Seemeilen. Die Eisparameter entlang der



Gefördert durch:  
Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie  
aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

## Entwicklung und Erprobung eines gekoppelten Eisvorhersage- und Routenoptimierungssystems

Förderkennzeichen: 03SX328A

31. März 2015

Hamburgische Schiffbau-  
Versuchsanstalt GmbH

Nils Reimer

kürzesten Ausgangsrouten sowie entlang zweier optimierter Alternativen sind in Abbildung 46 dargestellt.

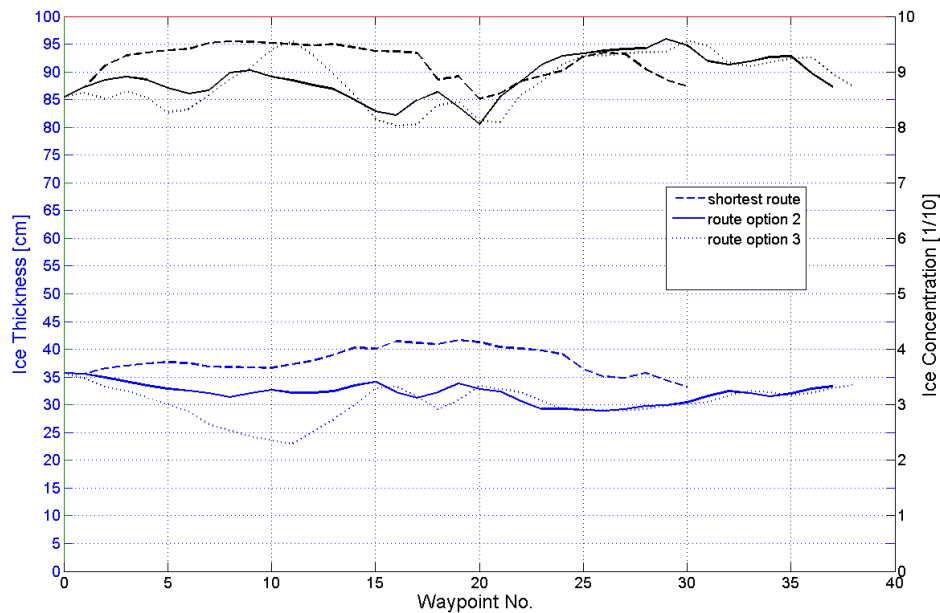


Abbildung 47 Prognostizierter Verlauf von Eiskonzentration und Eisdicke, alle Optionen

In Abbildung 48 ist der prognostizierte Widerstands- und Geschwindigkeitsverlauf über den Wegepunkten aufgetragen. Für die beiden Routenalternativen ergibt sich aufgrund der leichteren Eisverhältnisse eine sichere Maximalgeschwindigkeit von 7Knoten über die gesamte Strecke.



Gefördert durch:  
Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie  
aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

## Entwicklung und Erprobung eines gekoppelten Eisvorhersage- und Routenoptimierungssystems

Förderkennzeichen: 03SX328A

31. März 2015

Hamburgische Schiffbau-  
Versuchsanstalt GmbH

Nils Reimer

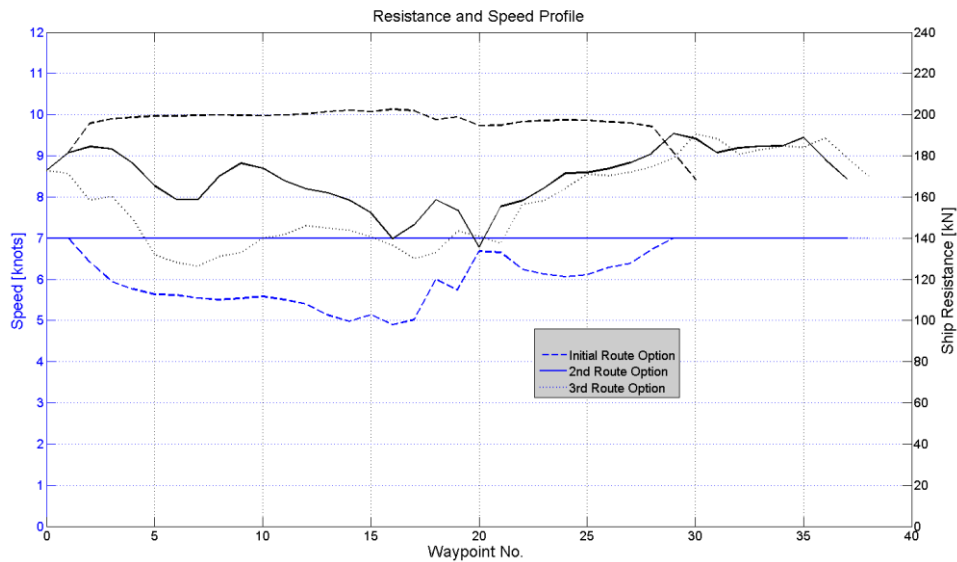


Abbildung 48 Prognostizierter Widerstands- und Geschwindigkeitsverlauf aller Optionen

In Abbildung 49 und 50 sind die tatsächlichen Eisverhältnisse sowie der ermittelte Geschwindigkeitsverlauf entlang der gewählten Routenoption gezeigt. Die Eisdicken liegen überwiegend zwischen 20cm-30cm und damit im Bereich der Vorhersage. Der Geschwindigkeitsverlauf zeigt starke Schwankungen durch das sich abwechselnde Durchfahren offener Rinnen und Bereiche mit geschlossener Eisbedeckung. Die Minimalwerte der Geschwindigkeit liegen bei etwa 2 Knoten, die Maximalwerte bei 10 Knoten. Es ist eine gute Korrelation zwischen dem Anstieg der Eisdicke und der Reduzierung der Geschwindigkeit vor allem an den Extrema ablesbar.



Gefördert durch:  
 Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie  
aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

## Entwicklung und Erprobung eines gekoppelten Eisvorhersage- und Routenoptimierungssystems

Förderkennzeichen: 03SX328A

31. März 2015

Hamburgische Schiffbau-  
Versuchsanstalt GmbH

Nils Reimer

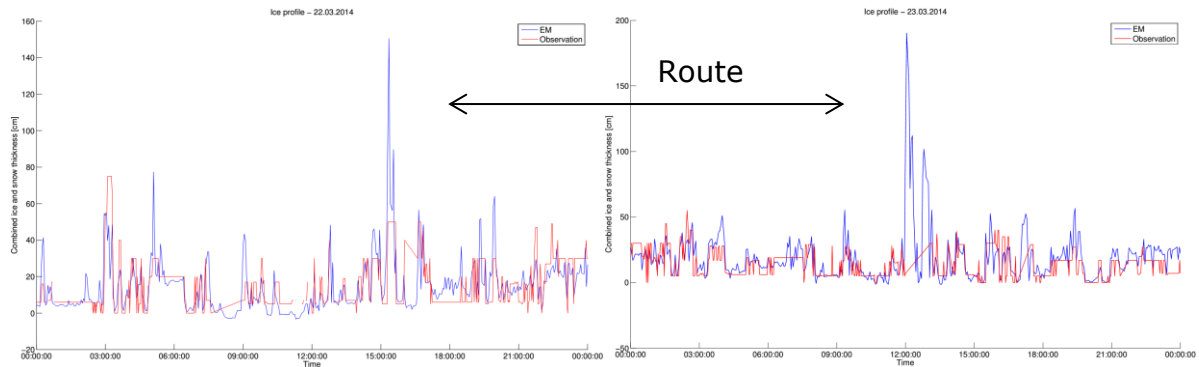


Abbildung 49 Beobachteter / gemessener Eisdickenverlauf (Eis + Schnee)

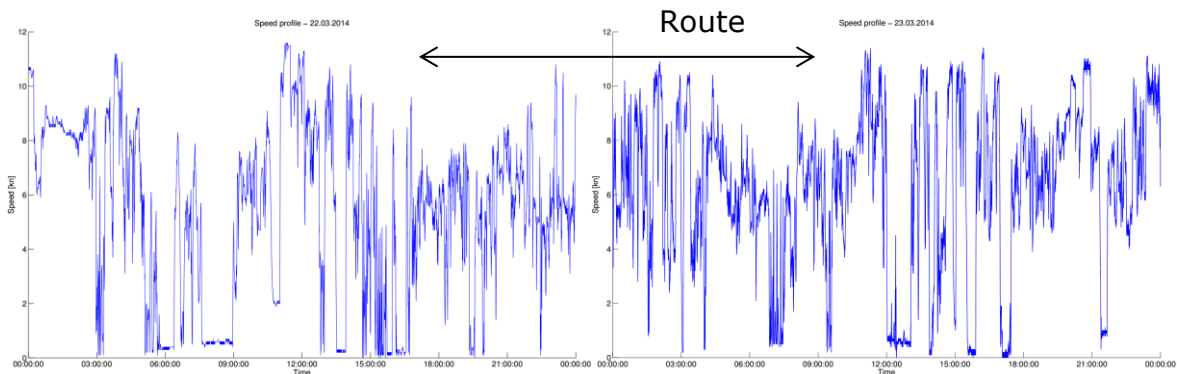


Abbildung 50 Ermittelter Geschwindigkeitsverlauf auf der Route

Die tatsächliche Fahrtzeit auf der Route betrug 17,5 Stunden. Dies entspricht einer Abweichung von 17% gegenüber der Prognose. An den Plots der Eisverhältnisse und Schiffsgeschwindigkeit aus Abbildung 49 ist gut zu erkennen, dass die Mittelung der Eisparameter und die daraus resultierende mittlere Geschwindigkeit in diesen Fall zu einer realistischen Prognose führen. Dies liegt vor allem daran, dass keine extremen Eisdicken durch Aufpressen im Testbereich angetroffen wurden. Im Plot sind solche kurz vor Beginn und kurz nach Abschluss der Route erkennbar. Weiterhin ist erkennbar, dass die Perioden der Schwankungen der Geschwindigkeiten im Bereich von 5-20 Minuten liegen. Bei einer mittleren Geschwindigkeit von 5 Knoten entspricht dies etwa dem Bereich von einem Kilometer und liegt damit unterhalb der Auflösung des Eisvorhersagemodells. Solange die Schwankungen regelmäßig bleiben und sich der Mittelwert nicht stark verschiebt, ist das System in der Lage gute Prognosen zu liefern.

Die Gitterzellengröße von  $5 \times 5 \text{ km}^2$  des regionalen Eisvorhersagemodells ist allerdings noch zu grob um Schollengrößen im relevanten Bereich von 10m - 300m aufzulösen. Für die Bestimmung und Prognose der erreichbaren Schiffsgeschwindigkeit ist die Größe einzelner Schollen relativ zur Schiffsgröße allerdings von hoher Bedeutung. Ist lediglich die Bedeckung einer Gitterzelle bekannt, kann nur abgeschätzt werden, wie häufig das Schiff durch offene Wasserflächen, ebenes Eis oder losere Schollenfelder unterschiedlicher Schollencharakteristik fährt. Eine Mittelung der Geschwindigkeit mit einem Wert für die Eiskonzentration führt nur zu realistischen Werten, wenn sich offene Rinnen und Bereiche ebenen Eises abwechseln.



Abbildung 51 Ebenes Eis (rechts) und Schollenfeld (links)

Noch deutlicher sind die Abweichungen der prognostizierten Geschwindigkeit bei Auftreten von deformiertem Eis. Dies wird vom Modell nur sehr bedingt vorhergesagt. Die mittlere Schiffsgeschwindigkeit sinkt auf extrem niedrige Werte wenn das Schiff sehr dicke Eisformationen durch rammen überwinden muss. Die vorhergesagte mittlere Eisdicke in der Gitterzelle muss dabei keine extremen Werte annehmen, so dass die Routenoptimierung von einer akzeptablen Geschwindigkeit ausgeht.

Weitere Abweichungen sind zu erwarten, wenn die Stoffeigenschaften des Eises zu einem untypischen Verhalten führen. Auf der Fahrt konnte dies beobachtet werden, als sich relativ dünnes Eis an die Außenhaut der Lance anheftete und zur Bildung eines Eiskeils führte, der mit dem umgebenden Eis zu einem erheblichen Zusatzwiderstand führte. Diese Effekte liegen außerhalb der Vorhersagbarkeit und müssen daher als Unsicherheiten bei der Prognose behandelt werden.

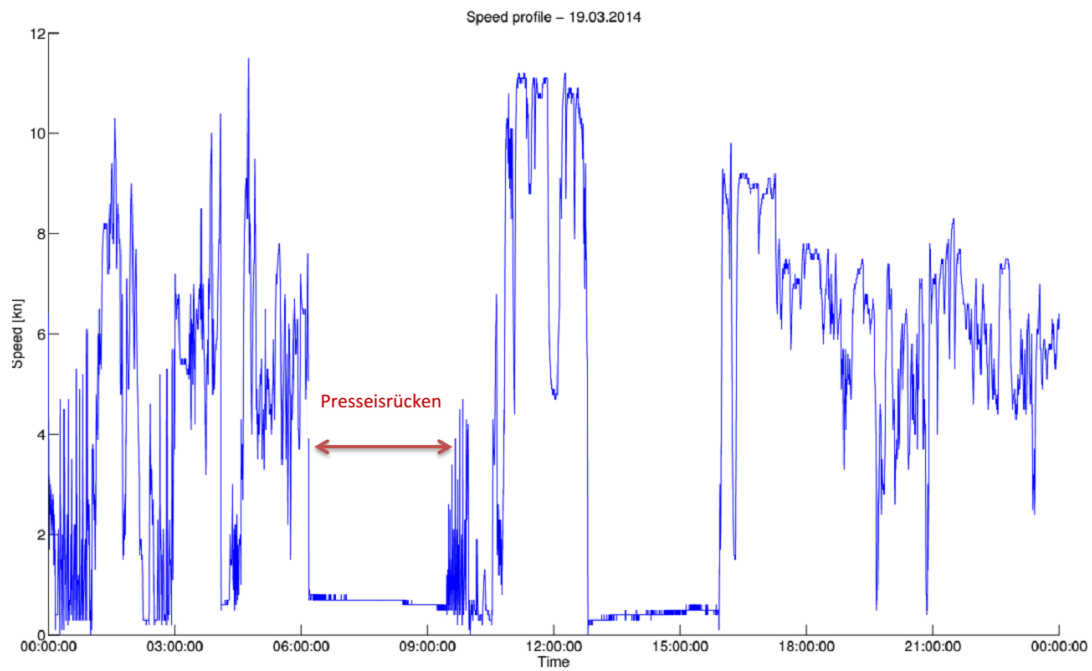


Abbildung 52 Geschwindigkeitsaufzeichnung im Presseisrücken, 19.03.2014



Abbildung 53 Anhaftendes Eis am Rumpf der Lance, erhöhter Widerstand durch Eiskeil





Gefördert durch:  
 Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie  
aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Entwicklung und Erprobung eines gekoppelten  
Eisvorhersage- und Routenoptimierungssystems

Förderkennzeichen: 03SX328A

31. März 2015

Hamburgische Schiffbau-  
Versuchsanstalt GmbH

Nils Reimer

Weitere Schritte, Empfehlungen für die Weiterentwicklung des Systems:

- Nutzen der 100%igen Kopplung von Atmosphäre-Ozean und Meereis im Modell sind hinsichtlich des dafür nötigen Rechenaufwandes zu prüfen.
- Um Informationen der Eiseigenschaften innerhalb einer Gitterzelle zu berücksichtigen, müssen hochaufgelöste Satelliteninformationen in die Eismodellierung eingebunden werden.
- Statt nur die Mittelwerte sollten ebenfalls die höchsten und niedrigsten auftretenden Eisdicken jeder Gitterzelle berücksichtigt werden, um die Gefahr des Steckenbleibens zu vermindern.
- Die Modellierung eisdynamischer Prozesse wie (z.B. rafting und rubble building) müssen durch verbesserte Parametrisierungen einfließen.
- Offene Rinnen müssen detektiert werden, die Nutzung dieser Rinnen muss in die Geschwindigkeitsprognose und Routenoptimierung einfließen.
- Der Einfluss der Eispressung auf den Schiffswiderstand muss quantifiziert werden.
- Die Materialeigenschaften des Eises müssen im Vorhersagemodell parametrisiert oder aus an eismechanischen Submodellen gewonnen werden.
- Potentiell gefährliche Routen sollen von der Optimierung automatisch erkannt und vermieden werden.



Gefördert durch:  
 Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie  
aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Entwicklung und Erprobung eines gekoppelten  
Eisvorhersage- und Routenoptimierungssystems

Förderkennzeichen: 03SX328A

31. März 2015

Hamburgische Schiffbau-  
Versuchsanstalt GmbH

Nils Reimer

## 2.2 Notwendigkeit und Angemessenheit der Arbeiten

Die Entwicklung eines gekoppelten Eisvorhersage- und Routenoptimierungssystems von hoher Qualität war nur unter Ausnutzung der Vorteile der besonderen Zusammensetzung des Verbundes im Vorhaben möglich. Das Institut für Meereskunde ist mit seiner Fernerkundungsgruppe an wesentlichen, neuen Entwicklungen von insbesondere Eisdickenprodukten aus Satellitenbeobachtung maßgeblich beteiligt. Das Arktisweite Vorhersagemodell basiert auf langjährigen Erfahrungen, die am Alfred Wegener Institut gesammelt werden konnten. Das Regionalmodell nutzt für die Initialisierung oben genannte Satellitenprodukte. Die Kopplung von Eis, Atmosphäre und Ozean berücksichtigt alle Antriebsgrößen der dynamischen Prozesse im Eis. Dies ist für die Simulation der Veränderungen innerhalb einer Vorhersage notwendige Bedingung. Die Prognose der Schiffsgeschwindigkeit in den unterschiedlichen Eisformationen kann heutzutage nur auf Basis von Modellversuchen erfolgen. Aus den oben aufgeführten Punkten ergibt sich ein besonderer Aufwand für zum Beispiel die Nutzung hoher Rechenkapazität am DKRZ, den Betrieb des großen Eistanks der HSVA und die Bestellung von hochaufgelösten Radarsatellitenbildern.

Die Aufgabe im Vorhaben ein operationell einsetzbares System zu entwickeln, konnte nur durch die Entwicklung der Schnittstellen zwischen den Einzelkomponenten, vor allem aber durch die Erprobung des Systems unter realistischen Bedingungen gewährleistet werden. Eine Probefahrt stellt ebenfalls einen besonderen Aufwand durch lange Vorausplanung, Materialtransport und -einsatz sowie relativ hohe Reisekosten und -dauer dar.

Im Projekt wurde daher darauf geachtet, eine möglichst maximale Ausnutzung aller kostenintensiven Anlagen zu erreichen. Beispiele hierfür sind:

- Nutzung von Rechenknoten im DKRZ zum Betrieb von HAMMER  
⇒ Hohe Rechenleistung für den operationellen Betrieb
- Durchführung von zwei zusätzlichen Modellversuchsserien im Eistank  
⇒ Zusätzliche Parametervariation für Prognosemethoden
- 24 Stundenbetrieb an Bord und an Land während der Erprobungsfahrt  
⇒ Verdopplung der Zeit für Systemerprobung



Gefördert durch:  
  
Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie  
aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Entwicklung und Erprobung eines gekoppelten  
Eisvorhersage- und Routenoptimierungssystems

Förderkennzeichen: 03SX328A

31. März 2015

Hamburgische Schiffbau-  
Versuchsanstalt GmbH

Nils Reimer

## 2.3 Voraussichtlicher Nutzen insbesondere Verwertbarkeit der Ergebnisse im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplanes

Der unter Abschnitt 2.1.3 erwähnte, noch sehr hohe Rechenaufwand zum Betrieb des regionalen Eisvorhersagemodells sowie die Einschränkungen bei der Datenübertragung stellen noch Hürden für einen operationellen Betrieb des Routenoptimierungssystems dar. Ein solcher Betrieb wird in Zukunft am wahrscheinlichsten hoheitlich durch die Anrainerstaaten der Arktis organisiert werden. Hohe Verwertungsmöglichkeiten ergeben sich im Aufbauprozess eines solchen Eisvorhersagedienstes sowie bei der Lieferung von Teilkomponenten. Darüber hinaus können viele innerhalb des Vorhabens entwickelte Module und Leistungen direkt interessierten Schiffsbetreibern angeboten werden. Im Zuge der Einführung des Polar Codes wird explizit die Nutzung von Systemen zur Routenberatung gefordert. Flaggenstaaten, Klassifikationsgesellschaften und Schiffsbetreiber sind also aufgefordert, diese Produkte nutzbar zu machen. Die innerhalb des Vorhabens erzielten Ergebnisse liefern mit einem unter operationellen Bedingungen getesteten Prototypen bereits mehr als eine Grundlage.

Die konkreten Verwertungsmöglichkeiten sind im Einzelnen in Tabelle 7 aufgeführt.

Tabelle 7 Verwertungsmöglichkeiten aus den Projektergebnissen

Lfd.	Bezeichnung	Zeithorizont
1	Nutzung neuer Satellitenprodukte zur Eisklassifizierung (SMOS), Verbesserung der Eisdienste	Sofort, bzw. nach weiterer Validierung der Produkte
2	Verbesserte numerische Eismodellierung für die Klimaforschung und für die Planung von Schifffahrtaktivitäten in der Arktis, Unterstützung von Eisdiensten	Ab sofort
3	Verbesserte Visualisierung von Eisformationen in elektronischer Seekartennavigation (ENC)	Ab sofort, Anpassung nach Einbindung des neuen S411 Standard durch die ENC-Software Hersteller
4	Verbesserte Methoden zur Geschwindigkeitsprognose in unregelmäßigen Eisformationen	Ab sofort
5	Transitsimulationen für Schiffe mit	Ab sofort



Gefördert durch:  
 Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie  
aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Entwicklung und Erprobung eines gekoppelten  
Eisvorhersage- und Routenoptimierungssystems

Förderkennzeichen: 03SX328A

31. März 2015

Hamburgische Schiffbau-  
Versuchsanstalt GmbH

Nils Reimer

	unterschiedlich hoher Eisbrechfähigkeit	
6	Planung von Forschungs- und Erprobungsfahrten	Ab sofort
7	Unterstützung von Schiffsleitsystemen und Rettungseinsätzen in der Arktis	Ab sofort

Das erfolgreiche IRO-2 Feldexperiment trägt wesentlich zur Einwerbung von weiteren Drittmitteln an den Universitäten bei. Die gewonnenen Daten und Erfahrungen finden nun u.a. in folgenden Projekten Anwendung: DFG Exzellenzcluster CliSAP Forschungsbereich Arktis und Permafrost, ESA Projekt SMOS+ Sea Ice, HGF Allianz Remote Sensing and Earth System Dynamics, EU Horizon 2020 Space-borne observations for detecting and forecasting sea ice cover extremes (SPICES), NPI Project N-ICE 2015.

## **2.4 Während der Durchführung des Vorhabens dem Zahlungsempfänger bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet bei anderen Stellen**

Neben dem Verbundvorhaben IRO-2 wird in mehreren Ländern an Projekten mit ähnlicher Zielsetzung gearbeitet. Viele dieser Projekte behandeln die Eisinformationen statistisch.

Das SpaceNAV Projekt nutzt real-time Beobachtungsdaten der Eis und Seegangsverhältnisse aus unterschiedlichen Satellitenprodukten zur Optimierung von Schiffsrouten. Im Gegensatz zum IRO-2 System treiben diese Informationen kein numerisches Vorhersagemodell an, sondern werden direkt in ein Routenplanungstool integriert. ([www.spacenav.eu](http://www.spacenav.eu)).

Das IRO-2 Projekt fiel in eine Phase schlechter Verfügbarkeit von hochauflösenden C-Band SAR-Bildern. Der Kontakt zum Satelliten Envisat ging am 8. April 2012 unerwartet verloren. Das Envisat-ASAR hat zuvor 10 Jahre lang zuverlässig hochauflösende Radarbilder geliefert, die unter anderem von Eisdiensten operationell zur Erstellung von Eiskarten genutzt wurden. Nach dem Ausfall von Envisat gab es Ersatz durch den kanadischen Radarsat-2 und die deutschen DLR-Satelliten TerraSAR-X bzw. der Konstellation Tandem-X.



Gefördert durch:  
 Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie  
aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Entwicklung und Erprobung eines gekoppelten  
Eisvorhersage- und Routenoptimierungssystems

Förderkennzeichen: 03SX328A

31. März 2015

Hamburgische Schiffbau-  
Versuchsanstalt GmbH

Nils Reimer

Der Zugang zu Radarsat-2-Aufnahmen ist durch die hohen Kosten sehr limitiert. Das genutzte Frequenzband von TerraSAR-X ist für die Meereisklassifikation nicht optimal, da kleinskalige Oberflächenrauigkeit von z.B. Reif und Eisblumen die Radarrückstreuung dominiert. Die neuen Möglichkeiten interferometrischer Eisfernerkundung mittels TanDEM-X sind noch weitgehend unerforscht und beschränken sich auf einzelne Fallbeispiele, wie z.B. der Bestimmung der Rotationsgeschwindigkeit einzelner Eisschollen. Mit der DLR-Mission TanDEM-L wird in Zukunft voraussichtlich die Beobachtung von Presseisrücken ermöglicht.

Mit der operationellen Inbetriebnahme des ersten Sentinel-Satelliten nach Ende des IRO-2 Projektes hat sich die Verfügbarkeit von geeigneten Daten für die Meereisfernerkundung grundsätzlich verbessert. Das Sentinel C-Band SAR eröffnet zwar keine grundlegend neuen Möglichkeiten zur Bestimmung von Eisparametern, da es auf bewährter Technologie basiert. ERS1/2, Envisat und Radarsat-2 lieferten bzw. liefern ähnliche Datenprodukte. Die grundsätzliche Verbesserung besteht in der regulären und zuverlässigen Verfügbarkeit von SAR-Daten, die durch das Copernicus-Programm den Nutzern kostenfrei zur Verfügung gestellt werden. Mit Sentinel 1B, einem identischen Satelliten im gleichen Orbit mit 180° Phasenverschiebung wird sich die gute Datenlage ab 2016 nochmal verbessern. Durch Laser-Technologien und einem Downlink über einen geostationären Satelliten wird eine räumlich und zeitlich sehr gute Abdeckung der Arktis in nahe Echtzeit ermöglicht. Das bedeutet, dass SAR-Aufnahmen nicht im Voraus geplant und vorher bestellt werden müssen, wie dies bislang der Fall war.

Die wissenschaftliche und technische Herausforderung besteht nun darin, diese neue Datenflut zu bewältigen. Bislang werden SAR-Daten bei den Eisdiensten noch visuell von trainierten Experten klassifiziert, da automatische Algorithmen noch nicht reif genug sind bzw. halb-automatische Verfahren im Einsatz sind. Bestimmte Anwendungen, wie die Bestimmung der Eisdrift oder die Objektdetektion (Schiffe, Eisberge) sind mit gewissen Einschränkungen schon jetzt automatisiert möglich. Aber gerade im wichtigen Eisrandbereich sind noch viele Methoden ungenügend. Dies ist bedingt durch die mehrdeutigen Radarsignaturen, die durch das komplexe Wechselspiel von Eis, Ozean und Atmosphäre auftreten können. Wellen, Wind und die vielfältigen Erscheinungsformen des Eises machen die automatische Parameter-Ableitung aus SAR-Daten zu einer



Gefördert durch:  
 Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie  
aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Entwicklung und Erprobung eines gekoppelten  
Eisvorhersage- und Routenoptimierungssystems

Förderkennzeichen: 03SX328A

31. März 2015

Hamburgische Schiffbau-  
Versuchsanstalt GmbH

Nils Reimer

hochkomplexen Aufgabe. Damit die neuen Satellitendaten nicht weitgehend ungenutzt in den Archiven verschwinden, sind weitere Anstrengungen zur Nutzung dieser Daten notwendig. Dabei muss auch die Entwicklung von geeigneten Ozean-Eis-Atmosphären-Modellen und Assimilationsmethoden weiter vorangetrieben werden, um die neuen Satellitendaten gewinnbringend nutzen zu können. Diese "Big Data" Herausforderung kann nur im Verbund von Geo- und Informationswissenschaften zusammen mit den Endanwendern bewältigt werden.

## **2.5 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse**

Innerhalb des Vorhabens wurden Teilaufgaben im Rahmen von Doktorarbeiten sowie Master-, Bachelor und Diplomarbeiten untersucht und bearbeitet. Neben den Arbeiten selbst sind hieraus weitere Veröffentlichungen entstanden.

Alexander Beitsch (2014), Uncertainties of a near 90 GHz sea ice concentration retrieval algorithm, Dissertation am Fachbereich Geowissenschaften, Universität Hamburg

David Alexander Bröhan (2014), Analysis of Arctic Sea-Ice Leads from Advanced Microwave Scanning Radiometer, Dissertation am Fachbereich Geowissenschaften, Universität Hamburg, Reports on Earth System Science, 153

Daniela Ehle (2011), Analysis of Breaking through Sea Ice Ridges for Development of a Prediction Method, Diplomarbeit, Studiengang Maschinen und Anlagenbau Studienschwerpunkt Schiffstechnik, Universität Duisburg- Essen

Philipp Hinse (2013), Model Tests for Determination of Ship Resistance in Level Ice under Lateral Pressure, Bachelor-Thesis, Studiengang Schiffbau, Technische Universität Hamburg-Harburg

Eric Lumm (2014), Developmnet of a Route Optimisation Method for Ships in Ice, Master-Thesis, Technische Universität Hamburg-Harburg

Weiterhin wurden Teilergebnisse des Vorhabens auf internationalen Fachkonferenzen in Form von Vorträgen und Postern vorgestellt:

RINA Ice Class Ships, London 2012





Gefördert durch:  
 Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie  
aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Entwicklung und Erprobung eines gekoppelten  
Eisvorhersage- und Routenoptimierungssystems

Förderkennzeichen: 03SX328A

31. März 2015

Hamburgische Schiffbau-  
Versuchsanstalt GmbH

Nils Reimer

ISOPE, Anchorage 2013  
Extremwetterkongress, Hamburg 2014  
Artic Technology Conference, Kopenhagen 2015

Das Projekt wurde außerdem innerhalb eines TV Beitrags auf dem Sender  
Arte (Sendung Xenius) zum Thema Nutzung von Satellitendaten  
eingebunden.

Im September 2014 wurden die Ergebnisse des Vorhabens und Erfahrungen aus  
dem Einsatz des Systems während der Erprobungsfahrt auf einem Workshop auf  
der SMM in Hamburg präsentiert.

#### Agenda des Workshops:

Welcome	14:00 Uhr
Introduction IRO-2 Project	14:10 Uhr
Presentation of Workpackages	14:20 Uhr
• Arctic Wide Ice Assimilation and Forecast Model	
• Regional Ice Forecast Model	
• Remote Sensing and Ice Satellite Products	
Coffee Break	15:20 Uhr
Presentation on Workpackages	15:30 Uhr
• Navigation and Routing Module	
• Data Transmission and Onboard Presentation	
•	
Open Discussion with Audience	16:10 Uhr



Gefördert durch:  
 Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie  
aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Entwicklung und Erprobung eines gekoppelten  
Eisvorhersage- und Routenoptimierungssystems

Förderkennzeichen: 03SX328A

31. März 2015

Hamburgische Schiffbau-  
Versuchsanstalt GmbH

Nils Reimer

## Danksagungen:

Dieses Vorhaben und die darin gewonnenen Ergebnisse wurden mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie gefördert und ermöglicht. Dank gilt außerdem dem Projektträger Jülich für die gute Betreuung des Projektes. Die Erprobungsfahrt mit dem Forschungsschiff RV Lance wurde zu einem erheblichen Teil mit Schiffsbetriebsmitteln des Landes Hamburg unterstützt. Für die Erprobung der endgültigen Ausgabe der Routen und Eiskarten stellte die Firma Transas dem Verbund kostenlos eine Software zur elektronischen Navigation und Seekartendarstellung zur Verfügung und war weiterhin bei der Erstellung der benötigten Schnittstellen unterstützend tätig. Der Verbund dankt weiterhin insbesondere der Crew des Forschungsschiffes Lance für den übermäßigen Einsatz während der Erprobungsfahrt im März 2014, der es ermöglichte im 24 Stunden Betrieb einen sehr umfangreichen und wertvollen Datensatz zu gewinnen. Außerdem gilt ein besonderer Dank Dr. Gerd Müller für die hervorragende wissenschaftliche Leitung und Koordination der Erprobungsfahrt.



Gefördert durch:  
 Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie  
aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Entwicklung und Erprobung eines gekoppelten  
Eisvorhersage- und Routenoptimierungssystems

Förderkennzeichen: 03SX328A

31. März 2015

Hamburgische Schiffbau-  
Versuchsanstalt GmbH

Nils Reimer

## Literatur

- [1] Jochmann, P.: Leitantrag zum Verbundvorhaben Eisvorhersage und Eis-Routen-Optimierung (Ice Forecast and Route Optimization, IRO-2) Hamburg, September 2011
- [2] Reimer, N.: Bericht AT 513/13 Zwischenbericht 3 Lastenhefterstellung Weiterentwicklung Navigationsmodell, Hamburg, Februar 2013
- [3] Kaleschke, Schlünzen, Pohlmann: Entwicklung eines Eisvorhersagesystems und Satellitenfernerkundung, Vorhabensbeschreibung des verbundvorhabens IRO-2, Hamburg 2011
- [4] Beitsch, A.; Kaleschke, L.; Kern, S. Investigating High-Resolution AMSR2 Sea Ice Concentrations during the February 2013 Fracture Event in the Beaufort Sea. *Remote Sens.* 2014, 6(5), 3841-3856; doi:10.3390/rs6053841
- [5] Beitsch, A., S. Kern, L. Kaleschke (2015) Comparison of SSM/I and AMSR-E Sea Ice Concentrations With ASPeCt Ship Observations Around Antarctica, *IEEE Trans. Geosc. Rem. Sens.* 53(4), 10.1109/TGRS.2014.2351497, April 2015
- [6] Bröhan, D.; Kaleschke, L., A Nine-Year Climatology of Arctic Sea Ice Lead Orientation and Frequency from AMSR-E. *Remote Sens.* 2014, 6(2), 1451-1475; doi:10.3390/rs6021451
- [7] Röhrs, J. and Kaleschke, L.: An algorithm to detect sea ice leads by using AMSR-E passive microwave imagery, *The Cryosphere*, 6, 343-352, doi:10.5194/tc-6-343-2012, 2012.
- [8] Röhrs, J., Kaleschke, L., Bröhan, D., and Siligam, P. K.: Corrigendum to "An algorithm to detect sea ice leads by using AMSR-E passive microwave imagery" published in *The Cryosphere*, 6, 343-352, 2012, *The Cryosphere*, 6, 365-365, doi:10.5194/tc-6-365-2012, 2012.
- [9] Tian-Kunze, X., Kaleschke, L., Maaß, N., Mäkynen, M., Serra, N., Drusch, M., and Krumpen, T.: SMOS-derived thin sea ice thickness: algorithm baseline, product specifications and initial verification, *The Cryosphere*, 8, 997-1018, doi:10.5194/tc-8-997-2014, 2014.



Gefördert durch:  
 Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie  
aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Entwicklung und Erprobung eines gekoppelten  
Eisvorhersage- und Routenoptimierungssystems

Förderkennzeichen: 03SX328A

31. März 2015

Hamburgische Schiffbau-  
Versuchsanstalt GmbH

Nils Reimer

- 
- [10] David Alexander Bröhan, Analysis of Arctic Sea-Ice Leads from Advanced Microwave Scanning Radiometer, Dissertation am Fachbereich Geowissenschaften, Universität Hamburg, Reports on Earth System Science, 153, 2014
- [11] Alexander Beitsch, Uncertainties of a near 90 GHz sea ice concentration retrieval algorithm, Dissertation am Fachbereich Geowissenschaften, Universität Hamburg, 2014
- [12] Markus, T. & D. Cavalieri: Snow depth distribution over sea ice in the southern ocean from satellite passive microwave data. In M. Jeffries, ed., *Antarctic Sea Ice: Physical Processes, Interactions and Variability*, no. 74 in *Antarctic Research Series*, pp. 19–39. American Geophysical Union, AGU, Washington, D.C., 1998.
- [13] Fock BH (2014): Hamburg system for mesoscale sea ice forecasting for ship routing. Technical documentation. 24 pp. Version 2014-06-13.
- [14] Kaleschke L, Fock BH, Gierisch A, Dobrynin M, Beitsch A, Bröhan D, Pohlmann T and Schlünzen KH (2012): Zwischenbericht IRO-2 – Universität Hamburg - 2012-02-11. 7 pp.
- [15] Kaleschke L, Fock BH, Gierisch A, Dobrynin M, Beitsch A, Bröhan D, Pohlmann T and Schlünzen KH (2012): Zwischenbericht IRO-2 – Universität Hamburg - 2012-08-11. 13 pp.
- [16] Kaleschke L, Fock BH, Gierisch A, Dobrynin M, Beitsch A, Bröhan D, Pohlmann T and Schlünzen KH (2013): Zwischenbericht IRO-2 – Universität Hamburg - 2013-02-11. 10 pp.
- [17] Kaleschke L, Fock BH, Gierisch A, Dobrynin M, Beitsch A, Bröhan D, Pohlmann T and Schlünzen KH (2013): Zwischenbericht IRO-2 – Universität Hamburg - 2013-08-11. 15 pp.
- [18] Kaleschke L, Fock BH, Gierisch A, Dobrynin M, Beitsch A, Bröhan D, Pohlmann T and Schlünzen KH (2014): Zwischenbericht IRO-2 – Universität Hamburg - 2014-02-11. 11 pp.
- [19] Kaleschke L, Fock BH, Gierisch A, Dobrynin M, Beitsch A, Bröhan D, Pohlmann T and Schlünzen KH (2014): Zwischenbericht IRO-2 – Universität Hamburg - 2014-08-11. 11 pp.



Gefördert durch:  
 Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie  
aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Entwicklung und Erprobung eines gekoppelten  
Eisvorhersage- und Routenoptimierungssystems

Förderkennzeichen: 03SX328A

31. März 2015

Hamburgische Schiffbau-  
Versuchsanstalt GmbH

Nils Reimer

- 
- [20] Gierisch A (2014): Short-range sea ice forecast with a regional coupled sea-ice-atmosphere-ocean model. Dissertation am Fachbereich Geowissenschaften, Universität Hamburg.
  - [21] Lindqvist, G.: A stright Forward Method Ship resistance in Ice
  - [22] Hinse, P.: Model Tests for Determination of Ship Resistance in Level Ice under Lateral Pressure, Bachelor-Thesis, Studiengang Schiffbau, Technische Universität Hamburg-Harburg, January 2013
  - [23] Lumm, E.: Development of a Route Optimisation Method for Ships in Ice, Master-Thesis, Technische Universität Hamburg-Harburg, March 2014
  - [24] Jochmann P, Reimer N, Kaleschke L, Müller G, Fock BH, Kauker F, Asseng J and Holfort J (2014): Ice Routing Optimization IRO-2 Validation Trial. HSVA Newswave 2014/1: 2-5. <http://goo.gl/Tj1BeY>
  - [25] Müller, G.: Erprobungsfahrt zur Eisroutenoptimierung, Folienpräsentation, Mai 2014



Gefördert durch:  
 Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie  
aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Entwicklung und Erprobung eines gekoppelten  
Eisvorhersage- und Routenoptimierungssystems

Förderkennzeichen: 03SX328A

31. März 2015

Hamburgische Schiffbau-  
Versuchsanstalt GmbH

Nils Reimer

## Anlagen

### 1. Erfolgskontrollbericht

#### 1.1 Beitrag zu den förderpolitischen Zielen

Der Beitrag des Projektes zu den förderpolitischen Zielen hat sich seit Antragstellung nur geringfügig geändert. Die Inhalte des hier vorgeschlagenen Forschungsprojektes „Eisvorhersage und RoutenOptimierung“ ist im Forschungsprogramm der Bundesregierung (BMWi) „Schifffahrt und Meerestechnik für das 21. Jahrhundert“ enthalten.

Im Kapitel 3 Forschung und Entwicklung in der Meerestechnik heißt es unter 3.3 Polartechnik: Zu fördern sind weiterhin Forschungs- und Entwicklungsarbeiten in folgenden Technologiebereichen

[...]

Eisfernerkundung und Routenplanung

Navigation im Eis

[...]

Des Weiteren werden in diesem Vorhaben untersuchte Problematiken in den Dokumentationen Nr. 563 und 580 des BMWi von der 5. und 6. Nationalen Maritimen Konferenz erwähnt.

Innerhalb des Projektes hat sich allerdings gezeigt, dass die stark auf Containerschifffahrt ausgerichtete deutsche Reederschaft weniger Potentiale in der Nutzung der Nordostpassage sieht als Tank- und Schüttgutschiffbetreiber aus dem Ausland. Dies liegt vor allem an der strategischen Routenausrichtung mit mehreren Stopps im Ostasiatischen Raum, der die Suezroute bevorzugen lässt.

Es zeigte sich allerdings im Vorhabenszeitraum ein deutlicher Anstieg von touristischen Aktivitäten in der Arktis. Dieser bezieht sich überwiegend auf Kreuzfahrten in die Eisrandzonen. Da die Kreuzfahrtschiffe meist nur subarktische Eisklassen (IC-IAS) aufweisen, ist das Routenoptimierungssystem gut auf sie zugeschnitten.

Die mit Abstand überwiegenden maritimen Aktivitäten in der Arktis sind nach wie vor mit der Gewinnung und dem Transport von Rohstoffen, vor





Gefördert durch:  
 Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie  
aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Entwicklung und Erprobung eines gekoppelten  
Eisvorhersage- und Routenoptimierungssystems

Förderkennzeichen: 03SX328A

31. März 2015

Hamburgische Schiffbau-  
Versuchsanstalt GmbH

Nils Reimer

allem Öl, Gas und Erzen verbunden. Hier ist vor allem das Projekt der Erdgasförderanlage auf der Yamal Halbinsel zu nennen, welches innerhalb der Laufzeit von IRO-2 deutlich fortgeschritten ist. Das Projekt beinhaltet unterschiedliche Schifffahrtsaktivitäten zum Transport von Ausrüstung und Anlagen zur Förderanlage und natürlich den Abtransport des Erdgases nach Europa und Asien. Der Bau einer Serie von bis zu 16 eisbrechenden Gastankern mit einer Länge von 300m und einer Breite von 50m hat bereits begonnen<sup>4</sup>. Zum Transport von Anlagen zur Förderanlage werden Schwergutfrachter mit einer Eisklasse ARC4 eingesetzt werden. Vertreter der Betreiber dieser Schiffe haben am IRO-2 Workshop auf der SMM teilgenommen und ihr Interesse am System zum Ausdruck gebracht. Das Projekt fügt sich damit in die stärkere Ausrichtung der deutschen maritimen Industrie als Anbieter für die internationale Offshore Industrie ein.

## 1.2 Wissenschaftlich-technische Ergebnisse, erreichte Nebenergebnisse und gesammelte Erfahrungen

Das erfolgreiche IRO-2 Feldexperiment trägt wesentlich zur Einwerbung von weiteren Drittmitteln an den Universitäten bei. Die gewonnenen Daten und Erfahrungen finden nun u.a. in folgenden Projekten Anwendung: DFG Exzellenzcluster CliSAP Forschungsbereich Arktis und Permafrost, ESA Projekt SMOS+ Sea Ice, HGF Allianz Remote Sensing and Earth System Dynamics, EU Horizon 2020 Space-borne observations for detecting and forecasting sea ice cover extremes (SPICES), NPI Project N-ICE 2015.

Für die HSVA stellen die auf der Probefahrt erfassten Daten eine wichtige Grundlage für die weitere Validierung von Modellversuchen im Eis durch Korrelationsmethoden dar.

## 1.3 Fortschreibung des Verwertungsplans

### 1.3.1 Erfindungen/ Schutzrechtsanmeldungen

Im Rahmen des Vorhabens wurden keine Erfindungen gemacht, die der Schutzrechtsanmeldung bedürfen würden. Dementsprechend

---

<sup>4</sup> Navigating the NSR: The Arctic Ice-Breaking LNG Carrier, TOTAL, Yamal LNG, ATC 2015



Gefördert durch:  
  
Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie  
aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Entwicklung und Erprobung eines gekoppelten  
Eisvorhersage- und Routenoptimierungssystems

Förderkennzeichen: 03SX328A

31. März 2015

Hamburgische Schiffbau-  
Versuchsanstalt GmbH

Nils Reimer

wurden keine Schutzrechtsanmeldungen getätigt und keine Schutzrechte erteilt.

Im Rahmen des Vorhabens wurden keine Schutzrechte Dritter verletzt. Die Schutzrechte der beteiligten Partner des Verbundvorhabens wurden in einem Kooperationsvertrag (Kooperationsvertrag über die Durchführung des Verbundvorhabens IRO-2, November 2011) zu Beginn des Verbundvorhabens geregelt. Der Kooperationsvertrag wurde dem PTJ zu Beginn des Vorhabens übermittelt.

### 1.3.2 Wirtschaftliche Erfolgsaussichten

Direkte wirtschaftliche Erfolgsaussichten ergeben sich vor allem aus den Teilergebnissen des Projektes:

<b>Lfd.</b>	<b>Bezeichnung</b>	<b>Zeithorizont</b>
1	Nutzung neuer Satellitenprodukte zur Eisklassifizierung (SMOS), Verbesserung der Eisdienste	Sofort, bzw. nach weiterer Validierung der Produkte
2	Verbesserte numerische Eismodellierung für die Klimaforschung und für die Planung von Schifffahrtaktivitäten in der Arktis, Unterstützung von Eisdiensten	Ab sofort
3	Verbesserte Visualisierung von Eisformationen in elektronischer Seekartennavigation (ENC)	Ab sofort, Anpassung nach Einbindung des neuen S411 Standard durch die ENC-Software Hersteller
4	Verbesserte Methoden zur Geschwindigkeitsprognose in unregelmäßigen Eisformationen	Ab sofort
5	Transitsimulationen für Schiffe mit unterschiedlich hoher Eisbrechfähigkeit	Ab sofort
6	Planung von Forschungs- und Erprobungsfahrten	Ab sofort
7	Unterstützung von Schiffsleitsystemen und Rettungseinsätzen in der Arktis	Ab sofort



Gefördert durch:  
 Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie  
aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Entwicklung und Erprobung eines gekoppelten  
Eisvorhersage- und Routenoptimierungssystems

Förderkennzeichen: 03SX328A

31. März 2015

Hamburgische Schiffbau-  
Versuchsanstalt GmbH

Nils Reimer

### 1.3.3 Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten

Neben der Bedeutung der Eisvorhersage und Routenoptimierung für die Schifffahrt und Meerestechnik ergeben sich aus dem Projekt auch wichtige Ergebnisse für die Klimamodellierung und Einbindung neuer Produkte aus Fernerkundungsdaten.

Der innerhalb des Projektes erfolgte Wissenstransfer zwischen geowissenschaftlichen und technischen Fachbereichen stellt für sich genommen einen Fortschritt bei der Einbindung der Klimamodellierung und Fernerkundung in Anwendungen für Industrie und Wirtschaft dar. Die entwickelten Schnittstellen zwischen Eismodellen und Transitsimulationen können für weitere Projekte und Untersuchungen / Szenarienentwicklungen für die Schifffahrt und Offshore Industrie genutzt werden.

### 1.3.4 Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit

Wie bereits in der eingehenden Beschreibung der Arbeitspakete erwähnt, wurde innerhalb des Projektes ein Prototyp für die gekoppelte Eisvorhersage und Routenoptimierung entwickelt. Dieser Prototyp ist noch mit gewissen Einschränkungen der Einsatzfähigkeit verbunden. Diese gliedern sich in fachliche sowie operationelle Einschränkungen.



Gefördert durch:  
 Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie  
aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Entwicklung und Erprobung eines gekoppelten  
Eisvorhersage- und Routenoptimierungssystems

Förderkennzeichen: 03SX328A

31. März 2015

Hamburgische Schiffbau-  
Versuchsanstalt GmbH

Nils Reimer

Tabelle 8 Anknüpfungspunkte bei einzelnen Aufgaben

<b>Fachliche Einschränkungen</b>	<b>Anknüpfungspunkte</b>
Beschränktes Modellierungsgebiet (Barentssee)	Erweiterung des Gebietes, dynamische Anpassung der Randbedingungen aus dem arktischen Modell
Einfluss deformierten Eises, der Schollengröße und des Eisdrucks	Einbindung hochaufgelöster Satelliteninformationen, Modellierung von Deformationsprozessen, Submodellierung
Genauigkeit des virtuellen Schiffsmodells, der tatsächlich verfügbaren Leistung	Entwicklung interaktiver Schiffsmodelle, Eingabe durch die Schiffsführung oder direkte Einbindung von Maschinendaten
Schiffswiderstand in Eis mit Seitendruck	Weitere Modellversuche, Nutzung von Daten aus anstehenden Großausführungsmessungen, Entwicklung numerischer Simulationen
<b>Operationelle Einschränkungen</b>	<b>Anknüpfungspunkte</b>
Teilmanuelle Überwachung des Betriebs	Entwicklung einer Steuer- und Kontrollsoftware zur Regelung der Prozesse und Kommunikation der einzelnen Module (Eisvorhersagen, Routenoptimierung, Visualisierung, Datentransfer)
Relativ hohe Rechenkapazität der Eisvorhersage für den operationellen Betrieb	Untersuchung zur weiteren Prozessoptimierung, Nutzung dynamisch an den Bedarf angepasster Speichersysteme (cloud computing)



Gefördert durch:  
 Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie  
aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Entwicklung und Erprobung eines gekoppelten  
Eisvorhersage- und Routenoptimierungssystems

Förderkennzeichen: 03SX328A

31. März 2015

Hamburgische Schiffbau-  
Versuchsanstalt GmbH

Nils Reimer

Begrenzung des an das Schiff übertragbaren Datenvolumens (Eiskarten)	Prüfung weiterer Datenkomprimierungsmöglichkeiten, Formate mit reduziertem Speicherbedarf für Eiskarten
Interaktive Kommunikation der Bordeinheit und Landbasis für das Editieren der Routen durch die Schiffsführung	Entwicklung einer Kommunikationseinheit zum Einlesen editierter Routen und Neuberechnung der Fahrtzeit

#### 1.4 Arbeiten die zu keinem Ergebnis geführt haben

Die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung aus Sicht einer Reederei konnte durch den Ausstieg von Beluga (IRO), Phoenix und Briese nur bedingt in die Untersuchungen einfließen. Kompensiert wurde dies durch enge Zusammenarbeit mit dem Verband Deutscher Reeder, den Mitgliedern des TWB und die Befragung nautischer Offiziere innerhalb des Lastenheftes.



Gefördert durch:  
 Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie  
aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Entwicklung und Erprobung eines gekoppelten  
Eisvorhersage- und Routenoptimierungssystems

Förderkennzeichen: 03SX328A

31. März 2015

Hamburgische Schiffbau-  
Versuchsanstalt GmbH

Nils Reimer

## Auszug des Profi Online Formulars:

Hamburgische Schiffbau-Versuchsanstalt Gesellschaft mit beschränkter Haftung

GZ:

### Erfolgskontrollbericht

FKZ: 03SX328A

Laufzeit des Vorhabens: 01.10.2011 - 30.09.2014

#### Vorhabenbezeichnung

Verbundprojekt: IRO2 - Eisvorhersage und Eis-Routen-Optimierung; Vorhaben: Entwicklung eines Navigationsmodells für unterschiedliche Schiffe und Eisbedingungen

#### 1. Beitrag des Ergebnisses zu den förderpolitischen Zielen, auch zwecks Evaluierung von Förderprogrammen/-schwerpunkten/-konzepten

Der Beitrag des Projektes zu den förderpolitischen Zielen hat sich seit Antragstellung nur geringfügig geändert. Die Inhalte des hier vorgeschlagenen Forschungsprojektes „Eisvorhersage und RoutenOptimierung“ ist im Forschungsprogramm der Bundesregierung (BMWi) „Schifffahrt und Meerestechnik für das 21. Jahrhundert“ enthalten.

Im Kapitel 3 Forschung und Entwicklung in der Meerestechnik heißt es unter 3.3 Polartechnik: Zu fördern sind weiterhin Forschungs- und Entwicklungsarbeiten in folgenden Technologiebereichen

[...]

Eisfernerkundung und Routenplanung

Navigation im Eis

[...]

Des Weiteren werden in diesem Vorhaben untersuchte Problematiken in den Dokumentationen Nr. 563 und 580 des BMWi von der 5. und 6. Nationalen Maritimen Konferenz erwähnt.

Innerhalb des Projektes hat sich allerdings gezeigt, dass die stark auf Containerschifffahrt ausgerichtete deutsche Reederschaft weniger Potentiale in der Nutzung der Nordostpassage sieht als Tank- und Schüttgutsschiffbetreiber aus dem Ausland. Dies liegt vor allem an der strategischen Routenausrichtung mit mehreren Stopps im Ostasiatischen Raum, der die Suezroute bevorzugen lässt.

Es zeigte sich allerdings im Vorhabenszeitraum ein deutlicher Anstieg von touristischen Aktivitäten in der Arktis. Dieser bezieht sich überwiegend auf Kreuzfahrten in die Eisrandzonen. Da die Kreuzfahrtschiffe meist nur subarktische Eisklassen (IC-IAS) aufweisen, ist das Routenoptimierungssystem gut auf sie zugeschnitten.

Die mit Abstand überwiegenden maritimen Aktivitäten in der Arktis sind nach wie vor mit der Gewinnung und dem Transport von Rohstoffen, vor allem Öl, Gas und Erzen verbunden. Hier ist vor allem das Projekt der Erdgasförderanlage auf der Yamal Halbinsel zu nennen, welches innerhalb der Laufzeit von IRO-2 deutlich fortgeschritten ist. Das Projekt beinhaltet unterschiedliche Schifffahrtsaktivitäten zum Transport von Ausrüstung und Anlagen zur Förderanlage und natürlich den Abtransport des Erdgases nach Europa und Asien. Der Bau einer Serie von bis zu 16 eisbrechenden Gastankern mit einer Länge von 300m und einer Breite von 50m hat bereits begonnen. Zum Transport von Anlagen zur Förderanlage werden Schwergutfrachter mit einer Eisklasse ARC4 eingesetzt werden. Vertreter der Betreiber dieser Schiffe haben am IRO-2 Workshop auf der SMM teilgenommen und ihr Interesse am System zum Ausdruck gebracht. Das Projekt fügt sich damit in die stärkere Ausrichtung der deutschen maritimen Industrie als Anbieter für die internationale Offshore Industrie ein.





Gefördert durch:  
 Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie  
aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

## Entwicklung und Erprobung eines gekoppelten Eisvorhersage- und Routenoptimierungssystems

Förderkennzeichen: 03SX328A

31. März 2015

Hamburgische Schiffbau-  
Versuchsanstalt GmbH

Nils Reimer

### **2. Wissenschaftlich-technische Ergebnisse des Vorhabens im Vergleich zu den ursprünglichen Zielen, erreichte Nebenergebnisse und gesammelte wesentliche Erfahrungen**

Entwicklung eines voll funktionsfähigen Prototyps einer gekoppelten Eisvorhersage und Routenoptimierung.

Test des Systems unter operationellen Bedingungen

Das erfolgreiche IRO-2 Feldexperiment trägt wesentlich zur Einwerbung von weiteren Drittmitteln an den Universitäten bei. Die gewonnenen Daten und Erfahrungen finden nun u.a. in folgenden Projekten Anwendung: DFG Exzellenzcluster CliSAP Forschungsbereich Arktis und Permafrost, ESA Projekt SMOS+ Sea Ice, HGF Allianz Remote Sensing and Earth System Dynamics, EU Horizon 2020 Space-borne observations for detecting and forecasting sea ice cover extremes (SPICES), NPI Project N-ICE 2015.

Für die HSVA stellen die auf der Probefahrt erfassten Daten eine wichtige Grundlage für die weitere Validierung von Modellversuchen im Eis durch Korrelationsmethoden dar.

### **3. Fortschreibung des Verwertungsplans.**

#### **3a. Erfindungen/Schutzrechtsanmeldungen und erteilte Schutzrechte, die vom AN oder von am Vorhaben Beteiligten gemacht oder in Anspruch genommen wurden, sowie deren standortbezogene Verwertung (Lizenzen u.a.) und erkennbare weitere Verwertungsmöglichkeiten**

Im Rahmen des Vorhabens wurden keine Erfindungen gemacht, die der Schutzrechtsanmeldung bedürfen würden. Dementsprechend wurden keine Schutzrechtsanmeldungen getätigt und keine Schutzrechte erteilt.

Im Rahmen des Vorhabens wurden keine Schutzrechte Dritter verletzt. Die Schutzrechte der beteiligten Partner des Verbundvorhabens wurden in einem Kooperationsvertrag (Kooperationsvertrag über die Durchführung des Verbundvorhabens IRO-2, November 2011) zu Beginn des Verbundvorhabens geregelt. Der Kooperationsvertrag wurde dem PTJ zu Beginn des Vorhabens übermittelt.

#### **3b. Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Auftragende (mit Zeithorizont) - z.B. auch funktionale/wirtschaftliche Vorteile gegenüber Konkurrenzlösungen, Nutzen für verschiedene Anwendergruppen/industrien am Standort Deutschland, Umsetzungs- und Transferstrategien**

- Nutzung neuer Satellitenprodukte zur Eisklassifizierung (SMOS), Verbesserung der Eisdienste, Ab sofort
- Verbesserte numerische Eismodellierung für die Klimaforschung und für die Planung von Schifffahrtaktivitäten in der Arktis, Unterstützung von Eisdiensten., Ab sofort
- Verbesserte Visualisierung von Eisformationen in elektronischer Seekartennavigation (ENC), Ab sofort, Anpassung nach Einbindung des neuen S411 Standard durch die ENC-Software Hersteller, Ab sofort
- Verbesserte Methoden zur Geschwindigkeitsprognose in unregelmäßigen Eisformationen, Ab sofort
- Transitsimulationen für Schiffe mit unterschiedlich hoher Eisbrechfähigkeit, Ab sofort
- Planung von Forschungs- und Erprobungsfahrten, Ab sofort
- Unterstützung von Schiffsleitsystemen und Rettungseinsätzen in der Arktis, Ab sofort

#### **3c. Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten nach Auftragende (mit Zeithorizont) - u.a. wie die geplanten Ergebnisse in anderer Weise (z.B. für weitere öffentliche Aufgaben, Datenbanken, Netzwerke, Transferstellen etc.) genutzt werden können. Dabei ist auch eine etwaige Zusammenarbeit mit anderen Einrichtungen, Firmen, Netzwerken, Forschungsstellen u.a. einzubeziehen**

Neben der Bedeutung der Eisvorhersage und Routenoptimierung für die Schifffahrt und Meerestechnik ergeben sich aus dem Projekt auch wichtige Ergebnisse für die Klimamodellierung und Einbindung neuer Produkte aus Fernerkundungsdaten.

Der innerhalb des Projektes erfolgte Wissenstransfer zwischen geowissenschaftlichen und technischen Fachbereichen stellt für sich genommen einen Fortschritt bei der Einbindung der Klimamodellierung und Fernerkundung in Anwendungen für Industrie und Wirtschaft dar. Die



Gefördert durch:  
 Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie  
aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Entwicklung und Erprobung eines gekoppelten  
Eisvorhersage- und Routenoptimierungssystems

Förderkennzeichen: 03SX328A

31. März 2015

Hamburgische Schiffbau-  
Versuchsanstalt GmbH

Nils Reimer

entwickelten Schnittstellen zwischen Eismodellen und Transitsimulationen können für weitere Projekte und Untersuchungen / Szenarienentwicklungen für die Schifffahrt und Offshore Industrie genutzt werden.

### **3d. wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit für eine mögliche notwendige nächste Phase bzw. die nächsten innovatorischen Schritte**

Aus den Erfahrungen innerhalb des Projektes und der Erprobungsfahrt ergeben sich folgende weitere Schritte zur Weiterentwicklung:

- Erweiterung des Gebietes, dynamische Anpassung der Randbedingungen aus dem arktisweiten Modell
- Einbindung hochaufgelöster Satelliteninformationen, Modellierung von Deformationsprozessen, Submodellierung
- Entwicklung interaktiver Schiffsmodelle, Eingabe durch die Schiffsführung oder direkte Einbindung von Maschinendaten
- Weitere Modellversuche, Nutzung von Daten aus anstehenden Großausführungsmessungen, Entwicklung numerischer Simulationen
- Entwicklung einer Steuer- und Kontrollsoftware zur Regelung der Prozesse und Kommunikation der einzelnen Module (Eisvorhersagen, Routenoptimierung, Visualisierung, Datentransfer)
- Untersuchung zur weiteren Prozessoptimierung, Nutzung dynamisch an den Bedarf angepasster Speichersysteme (cloud computing)
- Prüfung weiterer Datenkomprimierungs-möglichkeiten, Formate mit reduziertem Speicherbedarf für Eiskarten
- Entwicklung einer Kommunikationseinheit zum Einlesen editierter Routen und Neuberechnung der Fahrtzeit

### **4. Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben**

Die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung aus Sicht einer Reederei konnte durch den Ausstieg von Beluga (IRO), Phoenix und Briese nur bedingt in die Untersuchungen einfließen. Kompensiert wurde dies durch enge Zusammenarbeit mit dem Verband Deutscher Reeder, den Mitgliedern des TWB und die Befragung nautischer Offiziere

### **5. Präsentationsmöglichkeiten für mögliche Nutzer - z.B. Anwenderkonferenzen**

Das Projekt wurde auf der SMM im September 2014 einer interessierten Hörerschaft vorgestellt. Darüberhinaus wurden einzelne Eergebnisse auf mehreren internationalen Konferenzen vorgetragen. Im Rahmen des projekts wurde eine Homepage [www.iro-2.de](http://www.iro-2.de)

### **6. Einhaltung der Ausgaben-/Kosten- und Zeitplanung**

Alle Partner haben angegeben, sowohl den Zeit- als auch den Kostenplan eingehalten zu haben. Teilweise sind einzelne Arbeiten zur Optimierung des Prozessflusses und Datenaustausches zwischen den Partnern vorgezogen worden oder zu einem späteren Zeitpunkt im Projekt abgeschlossen worden. Da sich die Vorbereitungen der Erprobungsfahrt als sehr umfangreich darstellten wurden von einzelnen Partnern Umwidmungen beantragt, die einzeln durch PTJ geprüft worden sind.



Gefördert durch:  
 Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie  
aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

# Entwicklung und Erprobung eines gekoppelten Eisvorhersage- und Routenoptimierungssystems

Förderkennzeichen: 03SX328A

31. März 2015

Hamburgische Schiffbau-  
Versuchsanstalt GmbH

Nils Reimer

## 2. Berichtsblatt für deutsche Veröffentlichungen

### Berichtsblatt

<b>1. ISBN oder ISSN</b> geplant	<b>2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung)</b> Schlussbericht	
<b>3. Titel</b> Eisvorhersage und Eis-Routen-Optimierung (IRO-2) Entwicklung eines gekoppelten Eisvorhersage- und Routenoptimierungssystems		
<b>4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)]</b> Reimer, Nils Dobrynin, Mikhail Fock, Björn Hendrik Gerdes, Rüdiger Gierisch, Andrea Heygster, Georg Holfort, Jürgen Jochmann, Peter Kaleschke, Lars Kaminski, Thomas Kauker, Frank Melsheimer, Christian Pohlmann, Thomas Schlünzen, Heinke Schwarz, Joachim Segschneider, Jochen Strübing, Klaus Tegtmeier, Jan		<b>5. Abschlussdatum des Vorhabens</b> 30.09.2014
		<b>6. Veröffentlichungsdatum</b>
		<b>7. Form der Publikation</b> Schlussbericht
<b>8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse)</b> Hamburgische Schiffbau-Versuchsanstalt Gesellschaft mit beschränkter Haftung Bramfelder Straße 164 22305 Hamburg		<b>9. Ber.-Nr. Durchführende Institution</b> HSVA Bericht Nr. 1680
		<b>10. Förderkennzeichen</b> 03SX328A
		<b>11. Seitenzahl</b> 100
<b>12. Fördernde Institution (Name, Adresse)</b> Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi)		<b>13. Literaturangaben</b> 25
		<b>14. Tabellen</b> 8
		<b>15. Abbildungen</b> 53
<b>16. Zusätzliche Angaben</b>		
<b>17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)</b> Projekträger Jülich (PtJ), Zimmerstraße 26-27, 10696 Berlin, Juni 2013 Des Weiteren wurde zum Vorhaben diverse Konferenz- und Fachzeitschriftenbeiträge veröffentlicht		
<b>18. Kurzfassung</b> <p>1. Derzeitiger Stand von Wissenschaft und Technik Es existieren noch keine Eisvorhersagemodelle für die Planung von Schiffsrouten durch eisbedeckte Gewässer. Zuverlässige Prognosen der erreichbaren Schiffsgeschwindigkeit sind schwierig. Wechselwirkungen aus Atmosphäre, Eis und Ozean sind nur durch Nutzung von Fernerkundungsdaten modellierbar.</p> <p>2. Begründung/Zielsetzung der Untersuchung Der Rückgang der Eisbedeckung in der Arktis ermöglicht Zugang zu neuen Schiffsrouten und Rohstoffquellen. Effizienz und Risiken hängen von der Verfügbarkeit von Eisinformationen ab. Innerhalb des Vorhabens IRO-2 sollten Eisvorhersage und Schiffsroutenoptimierung in einem System zusammengeführt werden.</p> <p>3. Methode Entwicklung eines Prototyps für ein gekoppeltes Eisvorhersage und Routenoptimierungssystem für Schiffe. Die Eisvorhersage wird durch Satellitendaten initialisiert und liefert Eisparameter (Eiskonzentration, Eisdicke und Eisdrift) für die vorausliegenden 3-6 Tage. Der Output dient als Eingabe für ein Modul Zur Berechnung der schiffsspezifischen Geschwindigkeit in variierenden Eisbedingungen. Auf diesem Wege können Routen gezielt miteinander verglichen und optimiert werden.</p> <p>4. Ergebnis Ein funktionierender Prototyp bestehend aus den Einzelkomponenten Modellantrieb, Datenassimilierung, Eisvorhersage, Routenoptimierung sowie Visualisierung von Eis- und Routeninformationen konnte innerhalb des Vorhabens entwickelt werden. Das System wurde unter operationellen Bedingungen im März 2014 in der Barentssee getestet.</p> <p>5. Schlussfolgerung/Anwendungsmöglichkeiten Das System ist als Prototyp einsetzbar. Aus der Erprobung ergeben sich Verbesserungsmöglichkeiten. Die Auflösung des Systems liefert noch keine lokale Deformationsprozesse und offene Rinnen. Die Fahrzeitprognose führt für regelmäßige Eisverhältnisse zu akzeptablen Voraussagen. Neben der Routenberatung ergeben sich vor allem Anwendungsmöglichkeiten bei der Unterstützung des Betriebs von Offshore Anlagen.</p>		
<b>19. Schlagwörter</b> Eisroutenoptimierung, Eisvorhersage, Schifffahrt in der Arktis, Modellversuche, Fernerkundung		
<b>20. Verlag</b> geplant	<b>21. Preis</b> geplant	



Gefördert durch:  
  
 Bundesministerium  
 für Wirtschaft  
 und Energie  
 aufgrund eines Beschlusses  
 des Deutschen Bundestages

## Entwicklung und Erprobung eines gekoppelten Eisvorhersage- und Routenoptimierungssystems

Förderkennzeichen: 03SX328A

31. März 2015

Hamburgische Schiffbau-  
 Versuchsanstalt GmbH

Nils Reimer

### 3. Document Control Sheet für englische Veröffentlichungen

#### Document control sheet

<b>1. ISBN or ISSN</b> planned	<b>2. type of document (e.g. report, publication)</b> Veröffentlichung (Publikation)	
<b>3. title</b> Ice Forecast and Ice Route Optimization IRO-2 Development of a Coupled Ice Forecast and Route Optimisation System		
<b>4. author(s) (family name, first name(s))</b> Reimer, Nils Dobrynin, Mikhail Fock, Björn Hendrik Gerdes, Rüdiger Gierisch, Andrea Heygster, Georg Holfort, Jürgen Jochmann, Peter Kaleschke, Lars Kaminski, Thomas Kauker, Frank Melsheimer, Christian Pohlmann, Thomas Schlünzen, Heiner Schwarz, Joachim Segschneider, Jochen Strübing, Klaus Tegtmeier, Jan	<b>5. end of project</b> 30.09.2014	<b>6. publication date</b>
	<b>7. form of publication</b> Schlussbericht	
	<b>9. originators report no.</b> HSVA Report No. 1680	<b>10. reference no.</b> 03SX328A
	<b>11. no. of pages</b> 100	<b>12. sponsoring agency (name, address)</b> BMW i
<b>8. performing organization(s) name, address</b> Hamburgische Schiffbau-Versuchsanstalt Gesellschaft mit beschränkter Haftung	<b>13. no. of references</b> 25	<b>14. no. of tables</b> 8
	<b>15. no. of figures</b> 53	
<b>16. supplementary notes</b>		
<b>17. presented at (title, place, date)</b> Projekträger Jülich (PtJ), Zimmerstraße 26-27, 10696 Berlin, Juni 2013 Des Weiteren wurde zum Vorhaben diverse Konferenz- und Fachzeitschriftenbeiträge veröffentlicht		
<b>18. abstract</b> 1.Current Status of Research: Currently no ice forecast for the planning of routes through ice infested waters exist. Reliable predictions of the attainable ship speed is difficult to be obtained. Interaction of atmosphere, ice and ocean is can only be modelled using remote sensing data. 2.Motivation and Objectives: The decline of ice extent in arctic area offers new shipping routes and access to hydro carbon resources. Efficiency and risk for related operations are subject to availability of ice information. Within the reasearch project IRO-2 a combined ice forecast and route optimisation was to be developed. 3.Method: Development of a prototype for a coupled ice forecast and routing system for ships. The ice forecast is initialised by satellite data and is providing ice parameters (concentration, thickness and drift) for the upcoming 3-6 days. The output is used as an input for the ship speed prediction module. Thereby different routes can be compared to each other for optimisation of traveling time. 4.Results: A full functional prototype including model forcing, data assimilation, ice forecast, route optimisation and visualisation of ice and route information was developed throughout this project. The system was tested under operational conditions in March 2014 in Barents Sea. 5.Conclusions and Application: The system is applicable as a prototype. Some potential improvements can be suggested from the experience at first test. Local deformation and open leads are not resolved by the forecast system. The travel time prediction provides acceptable results for rather regular ice conditions. Besides application in routing assistance the system can be used for planning and operation assistance of offshore structures.		
<b>19. keywords</b> ice forecast, route optimisation, arctic shipping, remote sensing, ice navigation		
<b>20. publisher</b> planned	<b>21. price</b> planned	