
Evaluierung satelliten- und modellgestützter Eisinformationen zur Unterstützung des Forschungseisbrechers Polarstern

Diplomarbeit
für den Erwerb des Abschlusses
Diplom-Wirtschaftsingenieur für Seeverkehr
an der
Hochschule Bremen

In Kooperation mit dem
Alfred-Wegener-Institut
Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung
Bremerhaven

Sebastian Clemens Schulte-Kortnack
Matrikelnummer: 258206

Erstprüfer: Prof. Thomas Jung
Zweitprüfer: Dr. Lasse Rabenstein
Fachliche Beratung: Dr. Thomas Krumpen

Bremen, 28. Mai 2017

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	III
Tabellenverzeichnis	IV
1 Einleitung	1
1.1 Der Forschungseisbrecher FS Polarstern	1
1.2 Das Meereis im Einsatzgebiet	2
1.3 Planung und Anpassung der Schiffsroute im Eis	5
1.3.1 An Bord verfügbare Eisinformationen (bis 2014)	6
1.3.2 Hintergründe zur Einführung des ECS	6
1.4 Zielsetzung der Arbeit	7
2 Die Datenprodukte und das ECS	9
2.1 Satelliten- und Modelldatenprodukte	9
2.1.1 Wettersatellitendaten	9
2.1.2 Eiskonzentration	10
2.1.3 SAR Satelliten	11
2.1.4 Eisdrift aus passiven Mikrowellendaten	12
2.1.5 Modelldaten aus gekoppelten Meereis-Ozeanmodellen	12
2.2 Konzept zur Visualisierung der Satelliten- und Modelldaten	13
2.3 Nutzeranforderungen	14
2.4 Technische Anforderungen	15
2.5 Der MapViewer	15
3 Bewertung der einzelnen Satelliten- und Modelldatenprodukte	18
3.1 Wettersatellitendaten	19
3.2 Eiskonzentration	20
3.3 SAR Satelliten	22
3.4 Eisdrift aus passiven Mikrowellendaten	26
3.5 Modelldaten aus gekoppeltem Meereis-Ozeanmodell	27
4 Diskussion	30
4.1 Diskussion der Anwendbarkeit von Satelliten- und Modelldaten	30
4.2 Verbesserung der Anwendbarkeit durch die Visualisierung im MapViewer	31
4.3 Einschränkungen durch technische Gegebenheiten	32
4.3.1 Datenverbindung	32
4.3.2 IT Infrastruktur	33
5 Zusammenfassung	34
Referenzen	36

Abbildungsverzeichnis

1.1	Der Forschungseisbrecher Polarstern während eines Forschungseinsatzes im Eis (Quelle: M. Hoppmann, AWI).	1
1.2	Erscheinungsformen der Meeresoberfläche: a) Nilas (Quelle: J.Fitzpatrick, USGS), b) Pancake Eis (Quelle: NOAA), c) Grey Eis (Quelle: BSH), d) einjähriges Eis(AWI), e) mehrjähriges Eis (Quelle: Warwick Vincent, Université Laval), f) Presseisrücken (Quelle: Eli Duke, NSIDC), g) Rinne (Quelle: Earthdata), h) Polynia (Quelle: Earthdata), i) Schmelztümpel (Quelle: Karen Frey)	3
1.3	Einsatzgebiet der Polarstern: Gefahrene Schiffsrouten in der Zeit von 1987 und 2013 (Quelle: AWI). Haupteinsatzgebiet in der Arktis stellt die Framstraße, die zentrale Arktis und die Region um Spitzbergen dar. In der Antarktis beschränkt sich das Einsatzgebiet im Wesentlichen auf das Weddell-See.	5
2.1	Aufbau des IceGIS (Quelle: AWI): Zentrales Element des IceGIS Konzepts ist ein GeoServer. Dieser bündelt sowohl statische Daten, als auch Informationen aus schiffseigener Sensorik und Satelliten- und Modelldaten, die von externen Datenprovidern bezogen werden. Die Visualisierung der Raster und Vektordaten erfolgt dann mittels eines browserbasierten Frontends, dem MapViewer.	14
2.2	Screenshot der browserbasierten MapViewer Anwendung (Frontend des IceGIS): Das System dient der Darstellung von Vektor- und Rasterdaten wie Schiffsposition und Route, Satelliten- und Modelldaten, aber auch Informationen gewonnen aus bordeigener Sensorik. Visualisiert ist hier die AWZ sowie eine Landmaske und die zurückgelegte Schiffsroute. Rechtsseitig steht dem Anwender ein Menü mit diversen Einstellungsmöglichkeiten zur Verfügung. Das Statusfenster in der oberen linken Bildhälfte gibt die aktuelle Schiffsposition wider.	16
2.3	Zu sehen ist eine Sentinel-1 Aufnahme unter einer transparenten Eiskonzentrationskarte. Zusätzlich wird das aktuellen Bild des sigma S6 Ice Navigators (schwarzer Kreis) eingeblendet. Neben den Wegpunkten aus der ECDIS (grüne Dreiecke) ist auch die zurückgelegte Route (rote Linie) dargestellt.	17
3.1	Wettersatellitenbild (Quelle: NOAA) aufgenommen über der Beaufort See.	19
3.2	Darstellung der Running Composite Eiskonzentrationsdaten im IceGIS. Die Farbkodierung gibt Aufschluss über den Anteil der eisbedeckten Fläche innerhalb eines Pixels.	20
3.3	Häufigkeit von Verzögerungen, mit der die Eiskonzentrationsdaten nach Aufnahme durch den Satellit auf dem Server des Datenproviders verfügbar gemacht werden (blau) bzw. an Bord erhältlich sind (rot) (Quelle: AWI).	21

3.4	Anzahl der Sentinel-1 Bilder, die an einem zufällig gewählten Tag (hier 16. April 2017) über der Arktis aufgenommen wurden (Quelle: polarview.aq). Mehrere Aufnahmen am Tag sind in der Nordostpassage, der zentralen Arktis und insbesondere der Framstraße erhältlich.	22
3.5	Screenshot des ECS Systems, in dem eine Sentinel-1 Aufnahme zusammen mit dem Radarbild des sigma S6 Ice Navigators dargestellt wird. Die rote Linie zeigt die zurückgelegte Schiffsroute. Die grünen Vektoren bilden die Eisdrift der vergangenen 48 Stunden ab (siehe Kapitel 3.4).	23
3.6	Sentinel-1 Aufnahme im Vergleich zur Abbildung der Eisoberfläche des sigma S6 Ice Navigators (Quelle: AWI). In der Vergrößerung des SAR Bildes lassen sich die selben Schollenumrisse wie im sigma S6 Ice Navigator erkennen. Als deutlicher Vorteil von SAR zeigt sich der erheblich größere Abdeckungsbereich der Sentinel-1 Aufnahme.	24
3.7	Häufigkeit von Verzögerungen, mit der die Sentinel-1 Daten nach Aufnahme durch den Satellit auf dem Server des Datenproviders verfügbar gemacht werden (blau) bzw. an Bord erhältlich sind (rot) (Quelle: AWI).	24
3.8	Darstellung der OSI-405c Daten (grüne Vektoren) im IceGIS. Als Hintergrund ist eine Karte mit Grenzen der ausschließlichen Wirtschaftszonen (AWZ) eingestellt. Diese sind von Interesse, da nur mit Forschungsgenehmigung, der jeweiligen Länder, der Eintritt in die AWZ erlaubt ist.	26
3.9	Vergleich der TOPAZ4 Eiskonzentrationsvorhersage, für Framstraße und Barentssee, mit Composite Eiskonzentrationskarten (Quelle: Melsom et al., 2016).	28
3.10	Vergleich der TOPAZ4 Eisdriftvorhersagen, für den amerikanischen, asiatischen und europäischen Sektor der Arktis, mit aus SAR Daten ermittelter Eisdrift (Quelle: Melsom et al., 2016).	29

Tabellenverzeichnis

4.1	Gegenüberstellung der unterschiedlichen Satelliten- und Modelldatenprodukte hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit für die Ableitung verschiedener Eiseigenschaften. Die hier genannten Eiseigenschaften beeinflussen maßgeblich die Befahrbarkeit einer Packeiszone.	30
-----	---	----

1. Einleitung

1.1 Der Forschungseisbrecher FS Polarstern

Der Forschungseisbrecher FS Polarstern (Abbildung 1.1) wurde im Auftrag des Bundesministers für Forschung und Technologie von der Arbeitsgemeinschaft Howaldtswerke-Deutsche Werft Kiel AG (Kiel) und Werft Nobiskrug GmbH (Rendsburg) gebaut und 1982 in Dienst gestellt. Betrieben wird das Schiff vom Alfred-Wegener-Institut (AWI), Helmholtz Zentrum für Polar- und Meeresforschung, welches mittels des Forschungseisbrecher die logistische Versorgung von Forschungsstationen, wie Neumayer Station III in der Antarktis, sicherstellt. Zudem dient das Schiff als Plattform für wissenschaftliche Erkundungen und Experimente. Denn inhaltlich befasst sich das Institut mit dem geologischen Aufbau der Polarregionen, Struktur und Einordnung in die Erdgeschichte mittels Seismologie und Seismik, ebenso wie mit Forschung im Bereich der Klimaforschung, Meeresbiologie und Meeresgeologie. Die Beereederung des Forschungseisbrechers hat die Reederei F. Laeisz GmbH übernommen.



Abbildung 1.1: Der Forschungseisbrecher Polarstern während eines Forschungseinsatzes im Eis (Quelle: M. Hoppmann, AWI).

Die Polarstern ist 118 m lang und 25 m Breit. Bei einer maximalen Verdrängung von 17277 t hat das Schiff einen Tiefgang von 11,2 m, ihr Leergewicht beträgt 12012 t. Die Polarstern verfügt über 2 Verstellpropeller in Kortdüsen, die je nach Leistungsbedarf von jeweils 1 oder 2 Maschinen angetrieben werden. Jede der 4 Hauptmaschinen hat eine Leistung von 3529 kW. Unter Einsatz der 4 Hauptmaschinen verfügt die Polarstern über eine Gesamtleistung von über 14000 kW. Im freien Wasser kann sie mit einer maximalen Geschwindigkeit von etwa 16 kn fahren. Die Polarstern besitzt einen doppelwandigen Rumpf mit zusätzlichen Verstärkungen an Bug und Eisgürtel und ist vom Germanischen Lloyd für den ganzjährigen

Einsatz in der Packeiszone klassifiziert ¹. Im Eiseinsatz kann sie bis zu 1,5 m dickes ebenes Eis mit 5 kn durchfahren. Mehrjähriges Eis und Presseisrücken können durch Rammen gebrochen werden. Im Schnitt befindet sich das Schiff seit ihrer Indienststellung rund 310 Tage pro Jahr im Einsatz. Die Besatzung umfasst rund 44 Besatzungsmitglieder und es steht Platz für weitere 55 Wissenschaftler zur Verfügung. Abbildung 1.3 gibt einen Überblick über die zwischen 1987 und 2013 gefahrenen Schiffsrouten. Haupteinsatzgebiet in der Arktis stellt die Framstraße, die zentrale Arktis und die Region um Spitzbergen dar. In der Antarktis beschränkt sich das Einsatzgebiet im wesentlichen auf das Weddell-See.

1.2 Das Meereis im Einsatzgebiet

Der Schiffseinsatz in den Polarregionen stellt eine besondere Herausforderung für Mensch und Technik dar. Extreme Temperaturen und hohe Windgeschwindigkeiten, die Entlegenheit der Region und die Bildung einer geschlossenen Eisdecke im Winter erfordern Schiffe, die speziell für den polaren Einsatz konstruiert und ausgerüstet sind. Das Meereis, welches den Schiffseinsatz stark einschränkt, bedeckt in der Arktis im Winter eine Fläche von rund 16 Millionen km^2 . Mit Einsetzen des Frühjahrs, schmelzen weite Teile dann nahezu vollständig ab. Das Minimum in der Eisbedeckung in der Arktis wird im September erreicht. So ging im vergangenen Jahr (September 2016) das Eis bis auf eine Fläche von 4,1 Millionen km^2 zurück, was dem zweitniedrigsten jemals gemessenen Wert entspricht ². Der Grad der sommerlichen Eisbedeckung unterliegt, bedingt durch den Klimawandel, einem starken negativen Trend ^{3,4}. Die Reduktion im Sommer ist dabei abhängig vom Wärmeeintrag über die Atmosphäre und den Ozean ⁵. In der Antarktis verläuft die saisonale Eisentwicklung gegensätzlich. Hier erreicht die Eisausdehnung im September mit 18,5 Millionen km^2 ihr Maxima ⁶. Im Sommer (Februar) reduziert sich die eisbedeckte Fläche dann auf rund 2,8 Millionen km^2 . Anders als in der Arktis, sind hier keine Trends in der Eisbedeckung erkennbar ⁷.

Folgende Beschreibung der verschiedenen Meereistypen basiert auf Angaben von Johnston and Timco 2008 ⁸:

Meereis weist eine hohe Vielfalt an Formen auf. Die Bildung erfolgt bei einer Wassertemperatur von $-1,8^\circ C$. Das entspricht der Gefriertemperatur von Meerwasser mit einer Salinität von 35,000 ppm.

¹AWI: URL <https://www.awi.de/expedition/schiffe/polarstern/artikel/wahrzeichen-der-deutschen-polarforschung.html>, 2016b

²NSIDC: URL <https://nsidc.org/arcticseaicenews/>, 2017a

³Swart, N. C., Fyfe, J. C., Hawkins, E., Kay, J. E., and Jahn, A.: Influence of internal variability on Arctic sea-ice trends, *Nat. Clim. Change*, 5, 86–89, 2015

⁴Ding, Q., Schweiger, A., L'Heureux, M., Battisti, D. S., Po-Chedley, S., Nathaniel C. Johnson, E. B.-W., Harnos, K., Zhang, Q., Eastman, R., and Steig, E. J.: Influence of high-latitude atmospheric circulation changes on summertime Arctic sea ice, *Nature Climate Change*, 7, 289–295, doi: 10.1038/nclimate3241, 2017

⁵Serreze, M. C. and Barry, R. G.: Processes and impacts of Arctic amplification: a research synthesis, *Glob. Planet. Change*, 77, 85–96, 2011

⁶Massom, R. A. and Stammerjohn, S. E.: Antarctic sea ice change and variability – Physical and ecological implications, *Polar Science*, 4, 149–186, doi: 10.1016/j.polar.2010.05.001, URL <https://doi.org/10.1016/j.polar.2010.05.001>, 2010

⁷Yuan, N., Ding, M., Ludescher, J., and Bunde, A.: Increase of the Antarctic Sea Ice Extent is highly significant only in the Ross Sea, *Scientific Reports*, 7, doi: 10.1038/srep41096, 2017

⁸Johnston, M. and Timco, G.: Understanding and Identifying Old Ice in Summer, Canadian Hydraulics Centre and National Research Council Canada, 2008

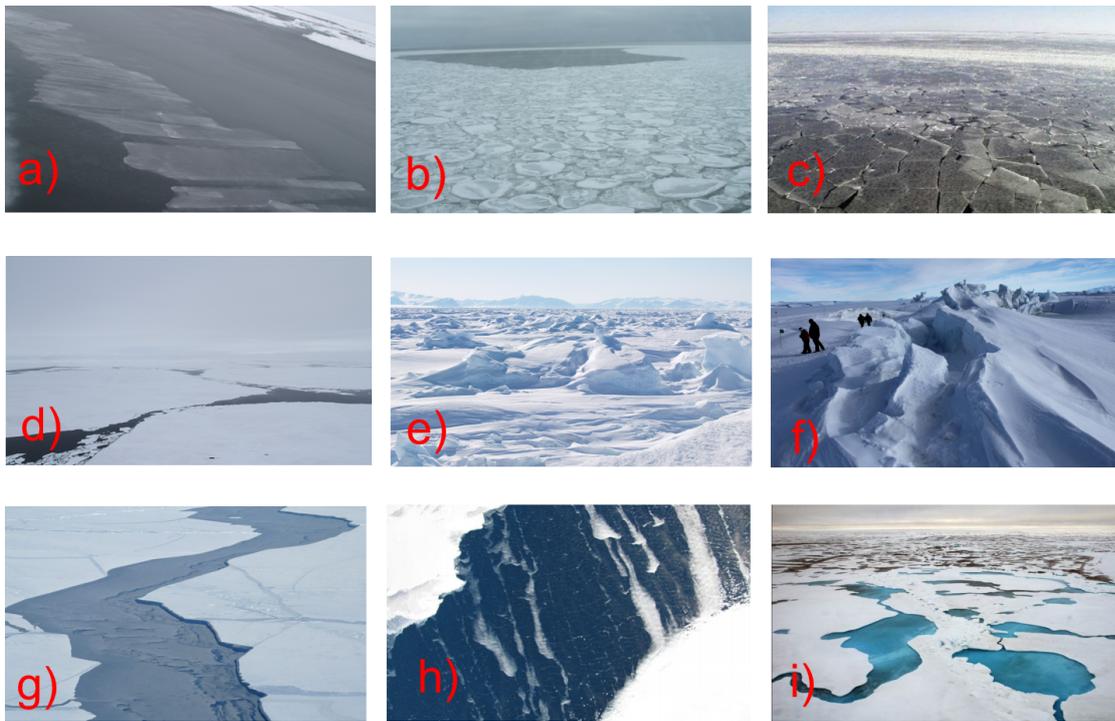


Abbildung 1.2: Erscheinungsformen der Meereisoberfläche: a) Nilas (Quelle: J.Fitzpatrick, USGS), b) Pancake Eis (Quelle: NOAA), c) Grey Eis (Quelle: BSH), d) einjähriges Eis(AWI), e) mehrjähriges Eis (Quelle: Warwick Vincent, Université Laval), f) Presseisrücken (Quelle: Eli Duke, NSIDC), g) Rinne (Quelle: Earthdata), h) Polynia (Quelle: Earthdata), i) Schmelztümpel (Quelle: Karen Frey)

Bevor die neu gebildeten Eiskristalle eine feste Oberfläche bilden, sammeln sie sich an der Wasseroberfläche. Unter ruhigen Seebedingungen bildet sich dann eine 5 bis 10 *cm* dünne elastische Eisschicht, das sogenannte Nilas (Abbildung 1.2, a)). Bei Seegang wird die Bildung einer geschlossenen Eisdecke unterbrochen und es kommt zur Pancake Eis Formung. Pancake Eis besteht aus 30 bis 300 *cm* großen runden Eisschollen, deren Ränder durch ständiges Kollidieren leicht erhöht sind (Abbildung 1.2, b)). Im weiteren Verlauf bilden dann auch Pancakes eine geschlossene Eisdecke. Die nächste Entwicklungsstufe wird als Grey Eis bezeichnet. Sie entwickelt sich aus Pancakes oder Nilas und besteht aus einer 10-30 *cm* dicken Eisschicht, die eine gräuliche Färbung aufweist (Abbildung 1.2, c)). Ab einer Stärke von 30 *cm* spricht man von einjährigem Eis, welches in dünnes (30-70 *cm*), mittleres (70-120 *cm*) und dickes einjähriges Eis (120-220 *cm*) unterteilt wird (Abbildung 1.2, d)). Während der Eisbildung sammeln sich Teile des Salzes als Lake zwischen den Eiskristallen und bilden Kanäle. Junges Meereis ist bedingt durch das Vorhandensein dieser Kanäle poröser als älteres Eis. Mit zunehmendem Alter entweicht dann die Salzlake, bis nach etwa einem Jahr in den oberen Schichten kaum noch Salz vorhanden ist. Durch Zufrieren der Kanäle härtet das Eis dann weiter aus. Eis, welches den Sommer überlebt, also nicht schmilzt, wird als mehrjähriges Eis bezeichnet. Mehrjähriges Eis kann deutlich dicker werden, und ist primär vor der Küste Kanadas und Grönlands anzutreffen (Abbildung 1.2, e)).

Hinsichtlich seiner Dynamik lässt sich Meereis in zwei Gruppen unterteilen:

- Festeis
- Frei treibendes Packeis.

Festeis ist an der Küste angewachsen oder durch Grundkontakt fest verankert. Frei treibendes Eis unterliegt, angetrieben von Wind und Meeresströmungen, einer kontinuierlichen Bewe-

gung, der sogenannten Eisdrift. Hauptantriebskraft der Eisdrift ist der Wind. Im Schnitt beträgt die Eisdrift 2 % der vorherrschenden Windgeschwindigkeit⁹. In der Arktis gibt es zwei große Driftsysteme, den Beaufortwirbel in der westlichen Arktis und die Transpolardrift im östlichen Bereich der Arktis. Der Beaufortwirbel ist ein sich im Uhrzeigersinn drehender Strom, der sich entlang von Grönland, Kanada und Alaska bis in die zentrale Arktis erstreckt. Die transpolare Drift treibt Meereis von der sibirischen Küste über den Nordpol in die Framstraße zwischen Grönland und Spitzbergen.

Bedingt durch unterschiedliche Driftgeschwindigkeiten und -richtungen des Eises können diese auseinander (Divergenz) oder gegeneinander (Konvergenz) driften. Von Konvergenz geprägte, dichte Eisfelder werden als Packeis bezeichnet, von Divergenz geprägte Eisfelder mit offenen Wasserflächen zwischen den Schollen, als offenes Packeis. Ist die Kraft gegeneinander driftender Eisflächen groß genug entstehen Spannungen und Druck. Zerbricht das Eis unter diesem Druck an den Kanten, türmen sich die Bruchstücke an Ober- und Unterseite der Eisfläche zu sogenannten Presseisrücken auf (Abbildung 1.2, f)). Bei anhaltendem Druck konsolidieren die Bruchstücke zu einem festen Verbund, Presseisrücken können so an der Oberseite eine Höhe von über 20 m erreichen und an der Unterseite über 40 m dick werden. Ebenso brechen Eisflächen auseinander, was dazu führt, dass offene Wasserflächen entstehen, sogenannte Rinnen, in denen sich neues Eis bilden kann (Abbildung 1.2, g)). Neben Rinnen gibt es noch Polynias (Abbildung 1.2 h)), weitaus größere offene Wasserflächen, die durch ablandige Winde an Festeiskanten oder durch warmes aufsteigendes Wasser entstehen.

In den wärmeren Sommermonaten kommt es dann zum Abschmelzen des Eises. Der Schmelzprozess wird initiiert durch das Schmelzen der Schneedecke. Das Schmelzwasser sammelt sich an der Eisoberfläche und bildet sogenannte Schmelztümpel (Abbildung 1.2, i)). Schmelztümpel weisen einen niedrigeren Albedo auf, was bedeutet, dass mehr eingestrahlte Energie absorbiert wird und der Schmelzprozess insgesamt beschleunigt. Durch das Aufheizen der Wassermassen beginnt dann auch, etwas zeitverzögert, die Eisunterseite zu schmelzen.

⁹Pease, C. H.: The size of wind-driven coastal polynias, *Journal of Geophysical Research*, 92(C7), 7049–7059, 1987

1.3 Planung und Anpassung der Schiffsroute im Eis



Abbildung 1.3: Einsatzgebiet der Polarstern: Gefahrene Schiffsrouten in der Zeit von 1987 und 2013 (Quelle: AWI). Haupteinsatzgebiet in der Arktis stellt die Framstraße, die zentrale Arktis und die Region um Spitzbergen dar. In der Antarktis beschränkt sich das Einsatzgebiet im Wesentlichen auf das Weddell-Meer.

Forschungs- und Logistikeinsätze der Polarstern, führen vornehmlich in die in Abbildung 1.3 gezeigten Regionen der polaren Meere wie Framstraße, zentrale Arktis, Nordostpassage und Weddell-Meer. Haupteinsatzzeitraum sind die Sommermonate (Mai-Oktober) in der Arktis und (November-März) in der Antarktis. Die Einsatzregionen in der Arktis sind geprägt durch ein- und zweijähriges Eis, welches mit Fortschreiten des Sommers weiter abschmilzt und in kleinere Schollenverbände aufbricht. Die vor Ort angetroffene Eisdicke ist also abhängig von Einsatzzeitpunkt und Region und schwankt zwischen 1.5 m (Framstraße im Mai) und 0.6 m (September in der zentralen Arktis). Das Eis im Weddell-Meer (Antarktis) ist, bedingt durch eine stärkere Schneeeauflage, deutlich dünner (bis 1.0 m). Das Vorankommen des Eisbrechers ist abhängig von den vorherrschenden Eiseigenschaften, die die Folge klein- und großräumiger thermodynamischer und dynamischer Prozesse sind. Im Folgenden werden kurz die wesentlichen Parameter genannt, die das Vorankommen des Schiffes beeinflussen, ohne auf deren Gewichtung weiter einzugehen:

- Eisdicke
- Porosität/Dichte des Eises
- Stärke der Schneeeauflage
- Vorhandensein von Fahrrinnen (divergente Eisdrift)
- Eispressung (konvergente Eisdrift)
- Vorhandensein von Presseisrücken (konvergente Eisdrift)

Im Vorfeld jeder Expedition wird auf Basis historischer Daten abgeschätzt, inwieweit bestimmte Zielregionen in Abhängigkeit der Jahreszeit zugänglich sind und wie hoch der damit verbundene zeitliche Aufwand für die Anfahrt und der Arbeiten vor Ort ist. Zum Zeitpunkt des Expeditionsbeginns wird dann eine optimale Route, basierend auf aktuellen Eisinformationen, ausgewählt. Die Route wird im Weiteren fortlaufend an die jeweiligen Gegebenheiten angepasst. Beispielsweise kann das Vorhandensein großer Schollengebilde oder Deformationsstrukturen das Vorankommen stark verlangsamen oder auch unmöglich machen. Je nach Eisbedingungen muss also auch der wissenschaftliche Zeitplan fortwährend den Bedingungen vor Ort angepasst werden. Daher kann es zu Änderungen in der wissenschaftlichen Schwerpunktsetzung oder der Zielregion kommen.

1.3.1 An Bord verfügbare Eisinformationen (bis 2014)

Die nautische Schiffsführung der Polarstern kann auf eine langjährige Erfahrung im Schiffsinsatz in eisbedeckten Gewässern zurückgreifen. Für die strategische Fahrtroutenplanung, also die Festlegung der ungefähren Fahrtroute zum Zielgebiet, haben in der Vergangenheit primär Eiskonzentrationskarten (Tagesmittel) der Universität Bremen Anwendung gefunden (siehe Kapitel 2.1.2). Die Eiskonzentrationsinformation wurde täglich an Bord übermittelt und unterstützt in analoger Form (ausgedruckte Übersichtskarte) die grobe Planung. Mit Hilfe der Daten lassen sich die Entfernungen, die im offenen Wasser und in einer geschlossenen Eisdecke zurückgelegt werden müssen, abschätzen. Mittels eines Erfahrungswerts, der die Durchschnittsgeschwindigkeit des Schiffs im offenen Wasser und im Packeis angibt, lässt sich dann die Anfahrtsdauer und der Aktionsradius des Schiffes berechnen.

Im Eis muss die Route fortwährend den jeweiligen Bedingungen vor Ort angepasst werden. Ein wesentliches Instrument zur Einschätzung der Fahrtroute ist das Eisradar der Firma Rutter (sigma S6 Ice Navigator). Das Eisradar löst einzelne Schollenstrukturen im direkten Schiffs-umfeld (2-4 *sm*) auf, und erlaubt so die taktische Anpassung der Schiffsroute in Abhängigkeit des Vorhandenseins großer Schollen oder Deformationen. Wenn die Wetterbedingungen es zulassen, finden zudem Eiserkundungsflüge statt. Ein nautischer Offizier erkundet dabei die Lage möglicher Fahrtrinnen und Hindernisse, die ein Vorankommen erschweren können. Die Eiserkundungsflüge finden aber eher unregelmäßig statt. Des Weiteren stehen den nautischen Offizieren Daten der Echtzeitempfangsanlage für Wettersatellitendaten zur Verfügung (Kapitel 2.1.1). Der hohe Bewölkungsgrad der Polarregionen, insbesondere in den Sommermonaten, erschwert allerdings die Anwendung für die Ableitung von Eisinformationen.

Vereinzelt Anwendung gefunden haben in der Vergangenheit auch Aufnahmen von SAR Satelliten (Kapitel 2.1.3). Die Daten wurden vor Fahrtbeginn bestellt und dienten der Abschätzung der Zugänglichkeit einer bestimmten Region. Beispielsweise im Vorfeld von Versorgungsfahrten der Neumayer Station III. Hierfür gab es in der Vergangenheit allerdings kein festgelegtes Verfahren was den Bezug, die Aufbereitung und Übermittlung der Daten angeht. Ob SAR Satellitendaten zur Verfügung standen, war daher abhängig vom Engagement einzelner Personen.

1.3.2 Hintergründe zur Einführung des ECS

In den vergangenen Jahren hat sich die Verfügbarkeit von Satellitendaten stetig erhöht. Der Zugang zu den Daten ist, bedingt durch die Open Access Politik der Raumfahrtbehörden, stark vereinfacht worden und Forschungsvorhaben haben neue Algorithmen entwickelt die die Datenauswertung erleichtern. Inzwischen gibt es also eine Vielzahl an Datenprodukten,

die operationell und echtzeitnah von Daten Providern zur Verfügung gestellt werden, und das Potential haben, taktische und strategische Entscheidungen vor Ort zu erleichtern. Im Vorfeld der Polarsternfahrt PS101¹⁰, wurde daher die Entwicklung eines “Electronic Chart System“ (ECS), das IceGIS, vorangetrieben, welches eine optimierte Nutzung der Schiffszeit ermöglichen soll. Das entwickelte IceGIS Konzept beinhaltet sowohl die Bereitstellung aktueller Satelliten- und Modelldaten von Daten Providern, als auch deren Visualisierung zusammen mit anderen Sensordaten, die an Bord erhoben werden. Neben der Optimierung der Schiffszeit, besteht auch ein starkes Interesse daran mit Hilfe aktueller Fernerkundungs- und Modelldaten die ökologische und ökonomische Effizienz des Schiffes zu verbessern. Diese Untersuchungen sind Gegenstand geplanter Studien.

1.4 Zielsetzung der Arbeit

Während meiner Teilnahme an der Polarstern Arktisexpedition PS92 in der Framstraße und zentralen Arktis war ich unter anderem mit der Bereitstellung tagesaktueller SAR Bilder (siehe Kapitel 2.1.3) und anderen Fernerkundungsinformationen betraut. Die Firma Drift+Noise betreibt sein 2015 einen Datenservice der Aufnahmen des Sentinel-1 Satelliten (siehe Kapitel 2.1.3) über der Polarstern und anderen Zielregionen aufbereitet und dem Schiff zum Download bereitstellt. Bei der dem Datenservice zu Grunde liegenden Software handelte es sich um einen Prototyp, dessen Leistungsfähigkeit auf der Expedition PS92 erstmalig getestet wurde. Die Anwendung der Daten zeigte schnell, dass für eine optimale Nutzung und Interpretation auch ein Tool zur Visualisierung unabdingbar ist. Auf der oben genannten Fahrt wurden dann verschiedene Verfahren zur Visualisierung getestet. Bereits damals wurde deutlich, das einige Fernerkundungsprodukte durchaus das Potential haben, den taktischen und strategischen Entscheidungsfindungsprozess zu unterstützen und so aktiv zu einer optimierten Nutzung von Schiffszeit beizutragen.

Im Anschluss an die Fahrt, und im Vorfeld von PS101, wurde daraufhin die Entwicklung eines umfangreicheren Systems zur Visualisierung von SAR Aufnahmen und weiterer satelliten- und modellbasierter Daten entwickelt. Das vom AWI entwickelte IceGIS Konzept, basiert auf der Datenbereitstellung externer Datenprovider wie Drift+Noise und OSISAF, als auch einer browserbasierten Visualisierungssoftware (MapView) entwickelt von dem Softwarehersteller WERUM. Das Konzept wurde Anfang 2016 auf der Polarstern implementiert und im Sommer 2016 erstmalig angewendet.

Ziel dieser Arbeit ist es, die verschiedenen Satelliten- und Modelldaten, die über Kommunikationssatelliten dem Schiff zur Verfügung gestellt werden, hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit für nautische Entscheidungen zu untersuchen. Dafür werden die einzelnen Datenprodukte getrennt voneinander beschrieben, deren Unsicherheiten beziffert und mögliche Verwendungen zur Unterstützung taktischer oder strategischer Entscheidungsfindungen genannt. Neben der Qualität der Satelliten- und Modelldaten, ist eine erfolgreiche Anwendung abhängig von deren Bereitstellung und Visualisierung. Ein weiterer Schwerpunkt dieser Arbeit ist daher auch eine eingehende Untersuchung des Bereitstellungsprozesses (Verzögerung zwischen Aufnahme und Verfügbarkeit an Bord) und des Systems zur Datenvisualisierung (MapView). Die Arbeit soll anschließend den Anwendern an Bord zur Verfügung gestellt werden, und so zu einem besseren Verständnis der an Bord verfügbaren Fernerkundungsprodukte und dessen Unsicherheiten beitragen.

¹⁰AWI: URL https://epic.awi.de/41994/1/PS101_WR.pdf, 2016c

Die Arbeit ist wie folgt gegliedert: In Kapitel 2 werden zunächst die Grundlagen der einzelnen Satelliten- und Modelldatenprodukte erläutert. Des Weiteren wird das IceGIS Konzept näher beschrieben, die Anforderungen seitens der Nutzer genannt und die technische Realisierung erläutert. Kapitel 3 geht auf die für die Navigation und Routenplanung ausschlaggebenden Eigenschaften der Satelliten- und Modelldaten ein und beurteilt ihre Anwendung und den zu erwartenden Nutzen hinsichtlich der Unterstützung von strategischen und taktischen Entscheidungsfindungsprozessen. In Kapitel 4 werden abschließend die Ergebnisse aus Kapitel 3 diskutiert und auf technische Problematiken des IceGIS eingegangen.

2. Die Datenprodukte und das ECS

In diesem Kapitel werden die einzelnen Satelliten- und Modelldatenprodukte, die operationell auf der Polarstern zur Verfügung stehen, beschrieben. Ferner wird das ECS, welches an Bord zur Visualisierung der Daten verwendet wird, skizziert.

2.1 Satelliten- und Modelldatenprodukte

Die Satelliten- und Modelldatenprodukte, die an Bord geliefert werden, müssen folgende Kriterien erfüllen:

- Zunächst muss mittels der an Bord gelieferten Informationen die Entscheidungsfindung unterstützt werden, das heißt, dass sich mittels der Modell- und Satelliteninformationen eine Aussage über den Zustand des Eises treffen lassen muss, die für die Navigation hilfreich ist.
- Des Weiteren müssen die an Bord genutzten Informationen operationell erzeugt werden, das heißt der Prozess der Datenerstellung ist voll automatisiert und wird in einer bestimmten Frequenz aktualisiert.
- Zusätzlich müssen die Produkte, die die Entscheidungsfindung unterstützen sollen, echtzeitnah verfügbar sein. Echtzeitnah bedeutet, dass die Differenz zwischen Datenerstellung und Verfügbarkeit möglichst klein ist.
- Ein weiteres Kriterium ist eine hinreichende Kenntnis über die Unsicherheiten der Datenprodukte.

Im Folgenden werden die ausgewählten Satelliten- und Modelldatenprodukte, die in das ECS eingespeist werden, vorgestellt.

2.1.1 Wettersatellitendaten

Die an Bord befindliche HRPT (High Resolution Picture Transmission) Empfangsanlage der Firma SeaSpace, ermöglicht einen direkten Downlink von Wettersatellitenbildern der NOAA-, FENGYUN- und METOP-Serien. Die Satelliten der Serien MetOp (EUMETSAT), FENG YUN (CMA) und NOAA (NOAA) befinden sich in polumlaufernden, sonnensynchronen Umlaufbahnen und haben Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) an Bord, deren Kanäle im Bereich des sichtbaren Lichts, nahem Infrarot und im Infrarot arbeiten. Durch das HRPT Verfahren sind die Daten mit Hilfe spezieller Empfangsanlagen weltweit verfügbar¹¹. Besonders eignen sich die Daten, für die großräumige Analyse der Wettersituation (Wolkenbedeckung, Zugbahnen von Zyklonen usw.). Durch ihre Umlaufbahn deckt jeder Satellit täglich die komplette Erde ab. Die räumliche Auflösung¹² der Daten beträgt 1,1 km¹³. Meereis und

¹¹EUMETSAT: URL <http://www.eumetsat.int/website/home/Satellites/CurrentSatellites/Metop/MetopDesign/index.html>, 2016

¹²Die räumliche Auflösung eines Aufnahmesystems der Fernerkundung gibt die Fläche eines Pixels auf der Erdoberfläche an

¹³NOAA: URL <http://noaasis.noaa.gov/NOAASIS/ml/avhrr.html>, 2013

offenes Wasser lassen sich in den von den Sensoren gelieferten Bildern, durch die unterschiedliche Albedo ¹⁴ gut unterscheiden. Eis strahlt einen Großteil des einfallenden Lichts zurück, während der Ozean nur einen kleinen Teil zurückstrahlt. Dadurch erscheint die Eisoberfläche hell und offene Wasserflächen dunkel, wodurch sie sich gut voneinander unterscheiden lassen. In der Arktis und Antarktis ist wetterbedingt der Blick auf das Meereis häufig durch Wolken versperrt.

2.1.2 Eiskonzentration

Über Kommunikationssatelliten wird das Schiff zusätzlich mit Eiskonzentrationsinformationen, abgeleitet aus Satellitendaten, beliefert. Die Eiskonzentration beschreibt den relativen Anteil an Meereis innerhalb eines Pixels. Angegeben wird dieser Anteil meist in Zehnteln (0/10-10/10) oder Prozent (0-100 %), wobei 0 % eine eisfreie und 100 % eine komplett eisbedeckte Fläche beschreibt. Abgeleitet wird die Eiskonzentration von Satelliten, die mit passiven Mikrowellen Radiometern ausgestattet sind. Der AMSR2 Sensor (Advanced Microwave Scanning Radiometer) an Bord der GCOM-W1 (Global Change Observation Mission-Water1), einem Satellit des japanischen Erdbeobachtungsprogramms (JAXA), findet maßgeblich Anwendung in der Ermittlung von Eiskonzentrationsinformationen. AMSR2 verfügt über 6 Kanäle, die einen Bereich von 6,93 *GHz* bis 89 *GHz* abdecken. Mittels dieser Frequenzen kann, vereinfacht gesagt, die Temperatur im Mikrowellenbereich, die sogenannte Helligkeitstemperatur, bestimmt werden. Da die Helligkeitstemperatur mit der Eiskonzentration korreliert, lässt sich mittels Algorithmen (zum Beispiel der BOOTSTRAP Algorithmus oder der ARTIST Sea Ice (ASI) Algorithmus) aus der ermittelten Temperatur, die Eiskonzentration ableiten. Die verschiedenen Algorithmen greifen teilweise auf unterschiedliche Frequenzbereiche zurück. Abhängig von der verwendeten Frequenz variiert auch die räumliche Auflösung des Datenprodukts, welche von 3,125 bis 25 *km* reichen kann. Eiskonzentration, abgeleitet aus hochfrequenten (89 *GHz*) Kanälen, hat die höchste räumliche Auflösung (3,125 *km*). Unabhängig von der Auflösung wird die Eiskonzentration in zwei verschiedenen Häufigkeitsfrequenzen bereitgestellt:

- Eiskonzentration als Tagesmittelwert
- Eiskonzentration als Running-Composite mit bis zu 8 Updates am Tag

Für den Tagesmittelwert werden alle Aufnahmen, die der Satellit innerhalb von 24 Stunden über einem bestimmten Gebiet gemacht hat, gemittelt. Dies führt zu einer Reduzierung des Fehlers, bedeutet aber auch, dass die Daten zum Zeitpunkt ihrer Bereitstellung bereits mindestens 24 Stunden alt sind. Für das Running-Composite werden hingegen mit jedem Schwad ¹⁵ des Satelliten fortlaufend neue Aufnahmen einem Mosaik hinzugefügt. Je nach Gebiet können so bis zu 8 Updates pro Tag erfolgen. Zwar werden Fehler nicht reduziert, jedoch stehen die Daten dem Nutzer bereits eine Stunde nach Aufnahme zum Abruf bereit, was die Eiskonzentration als Running-Composite zu einem echtzeitnahen Produkt macht.

¹⁴Albedo gibt das Rückstrahlungsvermögen einer nicht selbst leuchtenden Oberfläche an, je höher das Rückstrahlungsvermögen desto höher ist die Albedo.

¹⁵Der Schwad ist die Fläche, die der Satellit während der Erdumrundung beobachtet

2.1.3 SAR Satelliten

Ebenfalls an Bord übermittelt werden Bilder von SAR Satelliten. SAR (Synthetic Aperture Radar) ist ein bildgebender aktiver Mikrowellen Sensor, der im Gegensatz zu den passiven Mikrowellen Sensoren wie z.B. AMSR2, aktiv Mikrowellen emittiert und die Rückstreuung dieser misst. Somit ähnelt das bildgebende Verfahren den auf Schiffen eingesetzten Radaranlagen. Der Stärke der Rückstreuung wird eine bestimmte Graustufe zugeordnet, so erscheinen Flächen mit hoher Rückstreuung heller als Flächen mit geringer Rückstreuung. Die Stärke des gemessenen Signals ist abhängig von der Wellenlänge der emittierten Mikrowellen, dem Einfallswinkel, der Oberflächenbeschaffenheit und den dielektrischen Eigenschaften der abgebildeten Fläche ¹⁶. Bei der Beschaffenheit der Oberfläche hat die sogenannte Rauigkeit einen großen Einfluss auf die Messung. Glatte Flächen reflektieren die Strahlen vom Sensor weg, während unebene Flächen die Strahlung streuen und so zu einer Rückstreuung zum Sensor hinführen ¹⁷. Die derzeit verfügbaren, für die Schifffahrt relevanten SAR Satellitensysteme, arbeiten im L-Band (Wellenlänge 15-30 *cm*, Frequenz 1-2 *GHz*), C-Band (Wellenlänge 3,8-7,5 *cm*, Frequenz 4-8 *GHz*) und X-Band (Wellenlänge 2,4-3,8 *cm*, Frequenz 8-12,5 *GHz*) Bereich. SAR Systeme sind in der Lage zwischen verschiedenen Aufnahmegeometrien zu wechseln. So können sowohl breite Streifen mit niedriger Auflösung, als auch fokussierte Einzelbilder mit hoher Auflösung, aufgenommen werden. Zur Fernerkundung von Meereis wird zumeist auf Satelliten der Missionen Sentinel-1 (ESA) und TerraSAR-X (DLR) zurückgegriffen.

Sentinel-1

Die zwei ESA Satelliten der Mission Sentinel-1 arbeiten im C-Band Bereich und haben 4 verschiedene Aufnahmemodi: ¹⁸

- Strip-Map-Mode: 80 *km* breiter Schwad mit einer Auflösung von 5×5 *m*
- Interferometric Wide-Swath-Mode: 250 *km* breiter Schwad mit einer Auflösung von 5×20 *m*
- Extrawide-Swath-Mode: 400 *km* breiter Schwad mit einer Auflösung von 20×40 *m*
- Wave-Mode: Einzelaufnahme von 20×20 *km* mit einer Auflösung von 5×5 *m*

Primär werden Aufnahmen im Strip-Map-Mode gemacht, wo und mit welcher Häufigkeit Satellitenaufnahmen gemacht werden, wird durch die ESA festgelegt. Anwender haben keinen oder nur geringen Einfluss auf Aufnahmehäufigkeit und Modus.

TerraSAR-X

Der Satellit TerraSAR-X (DLR) arbeitet im X-Band Bereich und hat 3 verschiedene Aufnahmemodi: ¹⁹

¹⁶Dierking, W.: Sea ice monitoring by synthetic aperture radar, *Oceanography*, 26(2), 100–111, 2013

¹⁷Humboldt-State-University: URL http://gsp.humboldt.edu/OLM/Courses/GSP_216_Online/lesson7-2/interpreting-radar.html, 2014

¹⁸SUHET: Sentinel -1 User Handbook, European Space Agency, 1 edn., 2013

¹⁹Airbus: TerraSAR-X Image Product Guide Basic and Enhanced Radar Satellite Imagery, Airbus Defence and Space, 2.0 edn., 2014

- High Resolution Spot Light: Einzelaufnahmen von $10 \times 10 \text{ km}$ mit einer Auflösung von 1 bis 2 m
- Strip Map: 30 km breiter Schwad mit einer Auflösung von 3 bis 6 m
- Scan SAR: 100 km breiter Schwad mit einer Auflösung von 16 m

Der Satellit folgt keinem festen Aufnahmeplan, sodass Szenen vorab bestellt werden müssen. Die Szenen können über eine webbasierte Anwendung namens EOWEB (www.oweb.de) bezogen werden. Die Bestellung muss mindestens 17 Stunden vor der Aufnahme erfolgen. Bestellung und Bezug der Satellitenszenen ist kostenpflichtig, Wissenschaftler können aber über wissenschaftliche Projekte kostenfrei Satellitenszenen bestellen.

2.1.4 Eisdrift aus passiven Mikrowellendaten

Das vierte an Bord verfügbare Satellitenprodukt ist die Eisdrift der letzten 48 Stunden aus passiven Mikrowellendaten. Auf Grundlage von passiven Mikrowellendaten (siehe auch Kapitel 2.1.2) lässt sich mittels Korrelationstechnik aus Bildfolgen der Helligkeitstemperatur die Meereisdrift ableiten²⁰. In einem Raster mit einer Kantenlänge, die einem Vielfachen der Basisdaten entspricht, werden zwei Aufnahmen miteinander verglichen. Dazu wird für das Helligkeitstemperaturbild einer Gitterzelle in einem bestimmten Radius die maximale Korrelation in einem späteren Bild gesucht. Der Versatz der beiden korrelierenden Gitterzellen ergibt einen Vektor, der somit die mittlere Eisdrift in dem Zeitraum zwischen den beiden Aufnahmen angibt²¹. Das auf Polarstern verfügbare Eisdriftprodukt OSI-405c wird von OSI-SAF (EUMETSAT) zur Verfügung gestellt. Hierbei handelt es sich um ein von AMSR2, SSMIS und ASCAT abgeleitetes Multi-Sensor-Produkt²², welches die Eisdrift für die vergangenen 48 Stunden angibt und eine räumliche Auflösung von 62,5 km hat²³.

2.1.5 Modelldaten aus gekoppelten Meereis-Ozeanmodellen

Ebenfalls an Bord verfügbar sind Vorhersagen aus einem gekoppelten Meereis-Ozeanmodell. Meereismodelle simulieren die räumliche und zeitliche Entwicklung von Packeis. Abgebildet werden thermodynamische Prozesse wie Eiswachstum, Eisneubildung und Eisschmelze, aber auch dynamische Prozesse wie Eisbewegung und Eisdeformation. Bei gekoppelten Meereis-Ozeanmodellen wird zusätzlich die umgebende Wassersäule mit Temperatur, Salinität und ihren Strömungseigenschaften simuliert und tritt mit dem Meereis in Wechselwirkung. Für Vorhersagen werden zunächst alle notwendigen Parameter zum Ist-Zustand der modellierten Umgebung am Zeitpunkt X mittels spezieller Filter assimiliert und auf ein mehrdimensionales Raster interpoliert. Je nach Auflösung haben die Gitterzellen bei dreidimensionalen Meereis-Ozeanmodellen eine Kantenlänge von 8 km bis 110 km in der horizontalen und 10 m bis 1 km in der vertikalen Ebene. Während des Modelllaufs werden dann physikalische Prozesse mittels Grundgleichungen und Näherungsformeln simuliert. Angetrieben wird das Modell

²⁰Kaleschke, L.: Fernerkundung des Meereises mit passiven und aktiven Mikrowellensensoren, Ph.D. thesis, Universität Bremen, 2003

²¹Kaleschke, L.: Fernerkundung des Meereises mit passiven und aktiven Mikrowellensensoren, Ph.D. thesis, Universität Bremen, 2003

²²Ein Multi Sensor Produkt ist ein aus Daten mehrerer Sensoren abgeleitetes Produkt

²³Lavergne, T.: Algorithm Theoretical Basis Document for the OSI SAF Low Resolution Sea Ice Drift Product, Tech. rep., OSI SAF, 2015b

durch atmosphärische Vorhersagen. Die an Bord verfügbaren Modelldatenprodukte stammen vom Nansen Environmental and Remote Sensing Center (NERSC) entwickeltem gekoppelten Eis-Ozeanmodell TOPAZ4. TOPAZ4 liefert auf Basis einer wöchentlichen Assimilation von verschiedenen Parametern (Temperatur der Meeresoberfläche, in situ TS-Profil, Meeresspiegel, Eiskonzentration und/oder Dicke) täglich eine 10-tägige Vorhersage²⁴. Angetrieben wird der Modelllauf von aktuellen atmosphärischen Feldern. Für die Anwendung der Schiffsführung werden jeweils die folgenden 5-Tages-Vorhersagen hinsichtlich der Eiskonzentration, Eisdrift und Eisdicke genutzt.

2.2 Konzept zur Visualisierung der Satelliten- und Modelldaten

Die Übermittlung, Bündelung und Darstellung der Satelliten- und Modelldaten sowie schiffsbasierter Sensorik erfolgt mittels eines Electronic Chart System (ECS), welches sich IceGIS nennt. Das Konzept zur Visualisierung der Daten, insbesondere der Satelliten- und Modelldaten, wird im folgenden beschrieben. Hauptbestandteil des IceGIS Systems ist ein GeoServer, der alle eingespeisten Daten in einheitliche Formate und Kartenprojektionen reprojeziert und speichert (siehe Abbildung 2.1). Es werden sowohl schiffsbasierte als auch Daten externer Quellen eingebunden:

Die sogenannten statischen Daten (Background Daten), werden vorab auf den GeoServer eingespielt. Sie umfassen:

- Bathymetrie Daten (Quelle: General Bathymetric Chart of the Oceans, GEBCO vers. 2014)
- eine Landmaske (Quelle: Open Street Maps)
- die ausschließlichen Wirtschaftszonen (AWZ)

Die schiffsbasierten Daten, welche durch bordeigene Sensorik generiert werden, umfassen:

- GPS (Schiffsposition, Schiffskurs und Geschwindigkeit)
- Schiffsradar (sigma S6 Ice Navigator von Rutter)
- Wettersatellitenbilder der Bordwetterwarte (siehe Kapitel 2.1.1)
- Electronic Chart Display and Information System (ECDIS) Wegpunkte

Modell- und Satellitendaten, die über Kommunikationsverbindungen wie Iridium und Inmarsat, bezogen werden sind:

- Eiskonzentrationsdaten (siehe Kapitel 2.1.2)
- SAR Bilder (siehe Kapitel 2.1.3)
- Eisdrift der vergangenen 48 Stunden (siehe Kapitel 2.1.4)
- Eismodellvorhersagen (siehe Kapitel 2.1.5)

²⁴Simonsen, M., Hacket, B., Bertino, L., Rød, L. P., Waagbø, G. A., and Drivdal, M.: Product User Manual For Arctic Ocean Physical and Bio Analysis and Forecasting Products, EU Copernicus Marine Service, 5.3 edn., 2016

- Positionsdaten von autonomen Messbojen und AIS

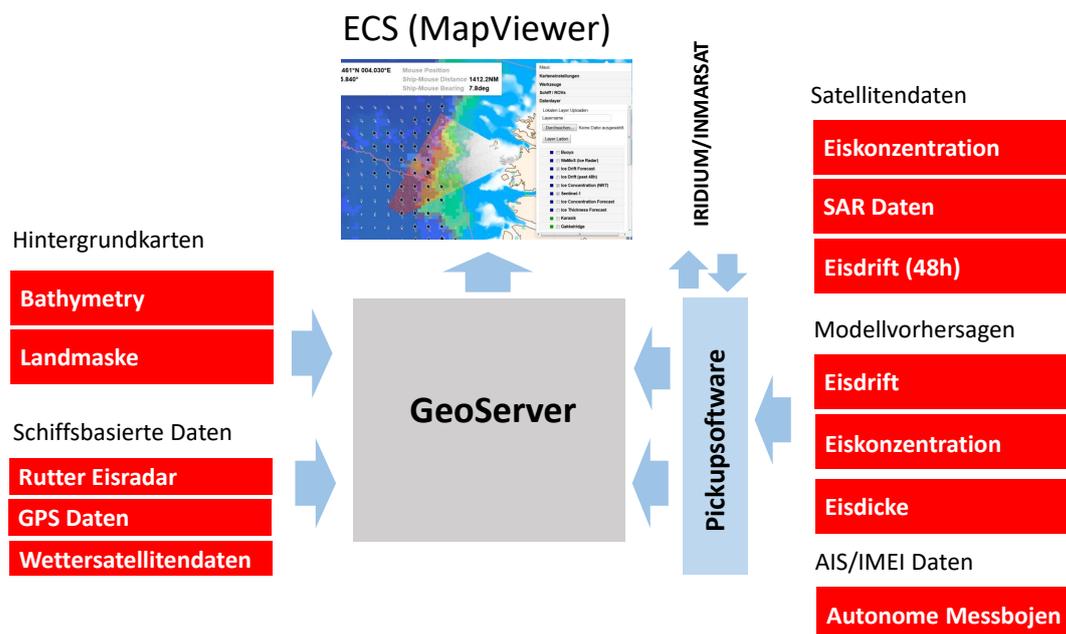


Abbildung 2.1: Aufbau des IceGIS (Quelle: AWI): Zentrales Element des IceGIS Konzepts ist ein GeoServer. Dieser bündelt sowohl statische Daten, als auch Informationen aus schiffseigener Sensorik und Satelliten- und Modelldaten, die von externen Daten Providern bezogen werden. Die Visualisierung der Raster und Vektordaten erfolgt dann mittels eines browserbasierten Frontends, dem MapViewer.

Die Versorgung mit externen Daten (Modell- und Satellitendaten) erfolgt über die sogenannte Pickup Software. Diese prüft über eine Kommunikationsverbindung (Inmarsat oder Iridium) fortlaufend, ob neue Daten auf den jeweiligen FTP Servern der Datenprovider zur Verfügung stehen, um sie anschließend automatisch herunterzuladen. Der Zugriff auf die Daten über einen FTP Server hat den Vorteil, dass abgebrochene Downloads an alter Stelle wieder aufgenommen werden können. Nach dem Download werden die aktuellen Daten in den GeoServer geladen. Der GeoServer reprojeziert und speichert die Daten, die dann zum Abruf und zur Visualisierung im Browser (MapViewer Frontend) zur Verfügung stehen.

2.3 Nutzeranforderungen

Die Visualisierung der Geodaten erfolgt über das Frontend des IceGIS, den MapViewer (siehe Kapitel 2.5). Bei der Entwicklung des MapViewers wurden die unterschiedlichen Anforderungen der zwei Nutzergruppen berücksichtigt. Im Folgenden werden kurz die Anforderungen der zwei Gruppen beschrieben:

- **Schiffsführung:**
Ergänzend zu Radar und ECDIS soll das System, durch die Visualisierung von satelliten- und modellbasierten Daten, als Werkzeug zur Unterstützung der Navigation im Eis dienen. Durch die dargestellten Satelliten- und Modelldateninformationen, großräumig und hochaufgelöst im unmittelbaren Umfeld, sollen strategische und taktische Entscheidungsprozesse grundlegend unterstützt werden.

- Wissenschaft:

Der Wissenschaft soll das System als Plattform dienen, die Eisinformationen bündelt und darstellt. Das System muss den Zugriff auf Eisinformationen von verschiedenen Regionen und deren Auswertung ermöglichen. Die dargestellten Satelliten- und Modelldatenprodukte sollen einen Überblick über die Eissituation in den verschiedenen Zielregionen vermitteln, auf dessen Grundlage weitere Routenverläufe und Stationen geplant werden können.

2.4 Technische Anforderungen

Bedingt durch die zwei Nutzergruppen, mit teilweise unterschiedlichen Anforderungen, ergeben sich eine Reihe von technischen Anforderungen an das System. Um verlässlich einen ständigen Zugriff auf das System zu gewährleisten, muss der Betrieb störungsfrei und idealerweise wartungsfrei sein. Grundsätzlich muss das System, zur Visualisierung von Satelliten- und Modelldaten, dazu in der Lage sein Raster- und Vektordaten in verschiedenen Formaten einzubinden. Neben dem Vorhandensein von Basisdaten zur Bathymetrie sollten auch Daten schiffsbasierter Sensoren und Systeme, wie GPS, sigma S6 Ice Navigator und ECDIS, einbindbar sein. Außerdem bedarf es einfacher Tools zum Abgreifen von Positionen oder der Messung von Distanzen. Um zu vermeiden, dass die Nutzung des Systems zu wissenschaftlichen Zwecken auf der Brücke erfolgt oder umgekehrt die Schiffsführung im laufenden Betrieb keinen direkten Zugang auf der Brücke hat, muss der Zugriff von verschiedenen Bordarbeitsplätzen aus ermöglicht werden.

2.5 Der MapViewer

Der MapViewer ist eine browserbasierte Anwendung, entwickelt von der Firma Werum, auf die sich über jeden Computer, der mit dem Bordnetzwerk verbunden ist, zugreifen lässt. In ihm lassen sich sowohl Raster- als auch Vektordaten visualisieren. Abbildung 2.2 zeigt die MapViewer Anwendung mit Landmaske und Bathymetrie ohne Datenlayer in polarstereografischer Projektion. In einer einblendbaren Statusanzeige (zu sehen in Abbildung 2.2 in der linken oberen Ecke) werden aktuelle Position und Kurs der Polarstern angezeigt sowie die relative Position des Mauszeigers zur aktuellen Position der Polarstern mit Distanz und rechtweisender Peilung. Das Menü (zu sehen in Abbildung 2.2 rechte Seite) umfasst folgende Positionen:

- **Karteneinstellungen**
- **Werkzeuge**
- **Schiff/ROVs**
- **Verwaltung der Datenlayer**

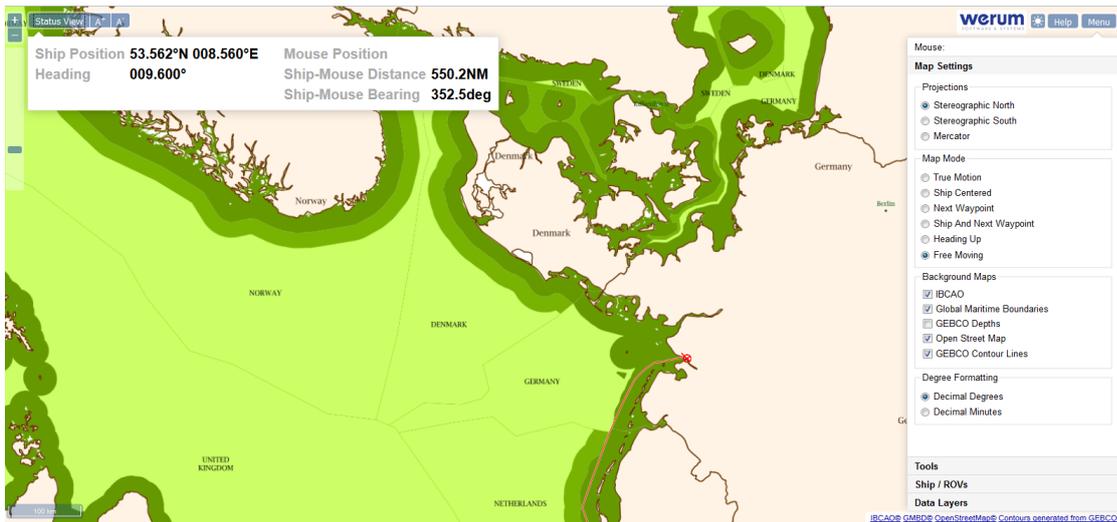


Abbildung 2.2: Screenshot der browserbasierten MapViewer Anwendung (Frontend des IceGIS): Das System dient der Darstellung von Vektor- und Rasterdaten wie Schiffsposition und Route, Satelliten- und Modelldaten, aber auch Informationen gewonnen aus bordeigener Sensorik. Visualisiert ist hier die AWZ sowie eine Landmaske und die zurückgelegte Schiffsroute. Rechtsseitig steht dem Anwender ein Menü mit diversen Einstellungsmöglichkeiten zur Verfügung. Das Statusfenster in der oberen linken Bildhälfte gibt die aktuelle Schiffsposition wieder.

Als Hintergrundkarten (Background Maps) stehen in den **Karteneinstellungen** verschiedene Bathymetrikarten und Landmasken zur Verfügung. Außerdem befindet sich hier die Möglichkeit zwischen polarstereographischer Projektion oder Mercatorprojektion zu wechseln und die Positionsanzeige auf Dezimalgrad oder Dezimalminuten einzustellen. Darüber hinaus lässt sich hier zwischen verschiedenen Map Modes hin- und herschalten. Als da wären:

- schiffszentrierte Darstellung
- Fokussierung auf den nächsten ECDIS Wegpunkt
- schiffszentrierte Darstellung zusammen mit dem nächsten ECDIS Wegpunkt
- richtungsweisende Darstellung
- nordweisende Darstellung
- freie Darstellung

Im Menüpunkt **Werkzeuge** steht ein Distanzmesser zur Verfügung, mit dem sich durch Anklicken in der Karte Distanzen mehrerer aneinander gereihter Positionen anzeigen lassen. Der Menüpunkt **Schiff/ROVs** erlaubt die Visualisierung der zurückgelegten Route der Polarstern und eingesetzter ROVs. Außerdem lassen sich hier die Wegpunkte der aktuellen Route aus dem ECDIS einblenden. Die verschiedenen Datenprodukte lassen sich im Menüpunkt **Datenlayer** auswählen und durch anklicken visualisieren. Die frei einstellbare Reihenfolge der Datenlayer im Menü legt die Reihenfolge, mit der die Datenlayer auf die Hintergrundkarte gelegt werden, fest. Zusätzlich lassen sich einzelne Layer in wählbarer Stärke transparent darstellen (zu sehen in Abbildung 2.3).

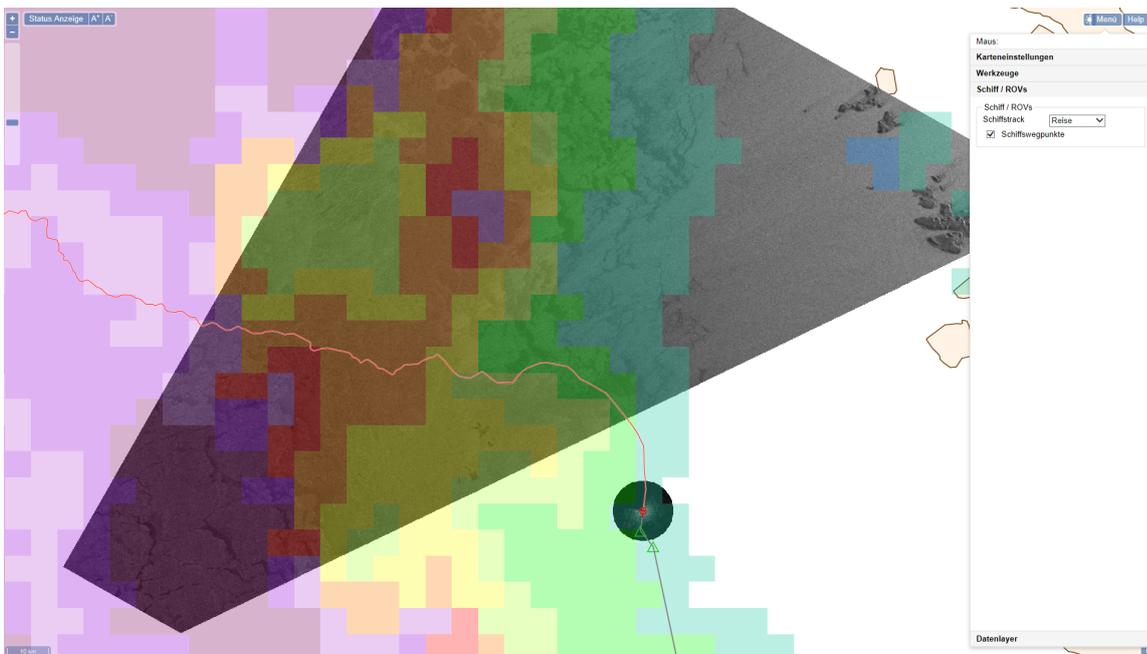


Abbildung 2.3: Zu sehen ist eine Sentinel-1 Aufnahme unter einer transparenten Eiskonzentrationskarte. Zusätzlich wird das aktuellen Bild des sigma S6 Ice Navigators (schwarzer Kreis) eingeblendet. Neben den Wegpunkten aus der ECDIS (grüne Dreiecke) ist auch die zurückgelegte Route (rote Linie) dargestellt.

3. Bewertung der einzelnen Satelliten- und Modelldatenprodukte

Im Folgenden werden die einzelnen Datenprodukte hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit zur Unterstützung von taktischen und strategischen Entscheidungsfindungsprozessen evaluiert. Ziel dieser Studie ist es, die grundsätzliche Eignung einzelner an Bord verwendeter Produkte für den Entscheidungsfindungsprozess zu untersuchen. Hierfür werden die Datenprodukte in Abhängigkeit ihrer

- **räumlichen Abdeckung**
- **zeitlichen Auflösung**
- **Verzögerung, mit der die Produkte an Bord zur Verfügung stehen,**
- **Unsicherheiten**
- **Anwendbarkeit für nautische Entscheidungen**

untersucht.

Inwieweit die Verwendung einzelner Produkte zu einer Zeitersparnis oder Steigerung der ökonomischen Effizienz des Schiffes beiträgt, lässt sich derzeit nicht, oder nur unzureichend beziffern. Da das IceGIS in dieser Form erst seit 2016 zur Verfügung steht, mangelt es an Daten, die für eine vergleichende Studie notwendig wären, wie beispielsweise eine Erfassung von Maschinendaten (Leistung, Verbrauch, etc.) unter Berücksichtigung der zur Verfügung stehenden Fernerkundungs- und Modelldaten.

3.1 Wettersatellitendaten

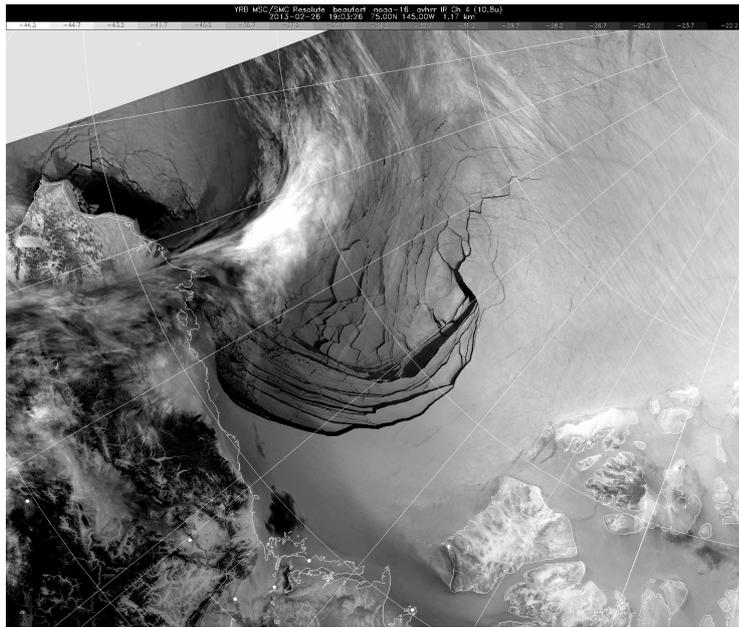


Abbildung 3.1: Wettersatellitenbild (Quelle: NOAA) aufgenommen über der Beaufort See.

Die an Bord befindlichen HRPT Empfangsanlagen ermöglichen einen Datenbroadcast mit Bildern der Wettersatelliten der NOAA-, FENGYUN- und METOP-Serien. Aufgrund der hohen Satellitenanzahl ist auch die Häufigkeit, mit der Bilddaten aktualisiert werden, relativ hoch. Im Schnitt erhält Polarstern über die HRPT Anlage bis zu 12 mal am Tag ein neues Bild. Da die Daten via Broadcast direkt vom Satelliten bezogen werden, ist die Verzögerung zwischen Bildaufnahme und Verfügbarkeit an Bord minimal. Die hohe Bewölkungsdichte in der Arktis und Antarktis, insbesondere während der Sommermonate, schränkt jedoch die Anwendbarkeit der Daten für eine Eisanalyse ein. Im Schnitt beträgt die absolute Bewölkungsdichte in der Arktis in den Monaten von Juni-Oktober rund 75 %²⁵. In den Wintermonaten fällt die Bewölkungsdichte geringer aus (60 %). An wolkenfreien Tagen lassen sich jedoch gut einzelne, vor allem größere Schollen anhand der Daten identifizieren. Die geringe Auflösung der Produkte (1.1 km, siehe Kapitel 2.1.2) ermöglicht es aber nicht Aussagen über das Vorhandensein kleinerer Fahrrinnen oder Deformationszonen zu treffen. Des Weiteren wird die Anwendbarkeit durch den Sonnenstand eingeschränkt, sodass während der Wintermonate Bildinformationen der optischen Kanäle nicht zur Verfügung stehen.

Als unerlässlich haben sich die Bilder der Wettersatelliten allerdings für die Flugplanung und Außenarbeiten erwiesen. Hier bieten die Daten dem geschulten Auge die Möglichkeit Wolken unterschiedlicher Schichtungen und Höhen zu identifizieren. Auch können einziehende Nebelbänke frühzeitig erkannt werden.

²⁵Eastman, R. and Warren, S. G.: Arctic Cloud Changes from Surface and Satellite Observations, Journal of Climate, 23, 4233–4242, doi: 10.1175/2010JCLI3544.1, 2010

3.2 Eiskonzentration

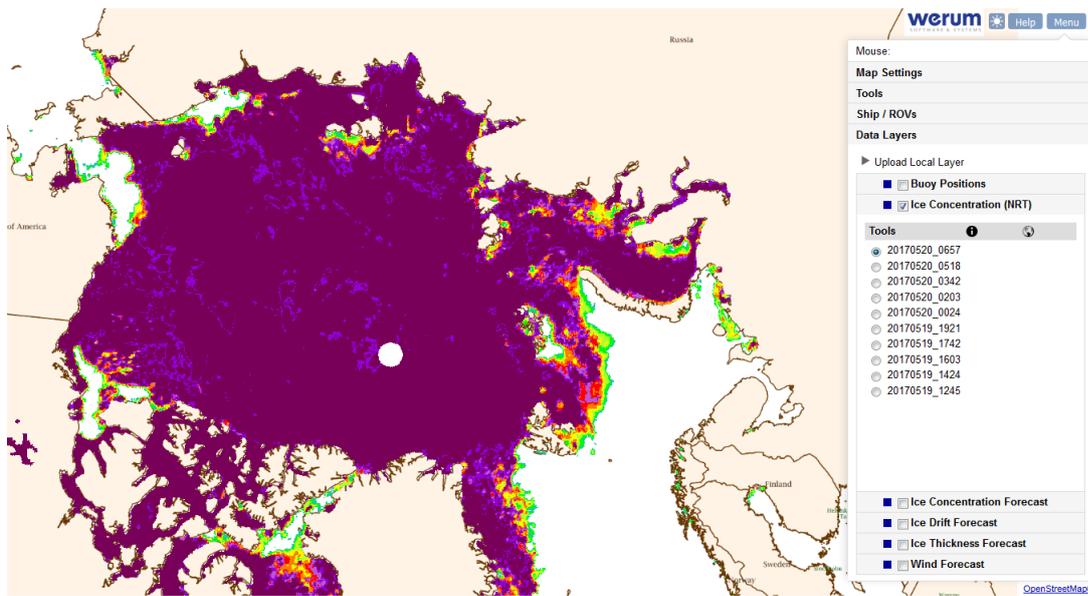


Abbildung 3.2: Darstellung der Running Composite Eiskonzentrationsdaten im IceGIS. Die Farbkodierung gibt Aufschluss über den Anteil der eisbedeckten Fläche innerhalb eines Pixels.

Die Eiskonzentrationsdaten, die derzeit an Bord von Polastern verfügbar gemacht und in das ECS importiert werden, basieren auf dem Running-Composite Produkt der Firma Drift+Noise. Hierbei handelt es sich um ein Eiskonzentrationsprodukt, welches mittels des ASI Algorithmus aus AMSR2 Daten (JAXA) abgeleitet wird. Die räumliche Auflösung des Datenprodukts beträgt 6.25 km pro Pixel. Trotz ihrer relativ geringen Auflösung, ermöglichen Eiskonzentrationsdaten eine Aussage über die Kompaktheit einer Eisfläche, beziehungsweise können zur Bestimmung der Eisrandlage herangezogen werden. Wie in Kapitel 2.1.2 beschrieben, besteht ein wesentlicher Vorteil des Running-Composite Verfahrens darin, dass Eiskonzentrationsinformationen mehrfach am Tag verfügbar gemacht werden, und das sich die Verzögerung zwischen Aufnahme und Auslieferung auf wenige Stunden reduziert. Abbildung 3.3 zeigt den zeitlichen Versatz zwischen Bildaufnahmen in der Arktis und Verfügbarkeit auf dem Server des Datenproviders sowie zwischen Bildaufnahme und Verfügbarkeit an Bord.

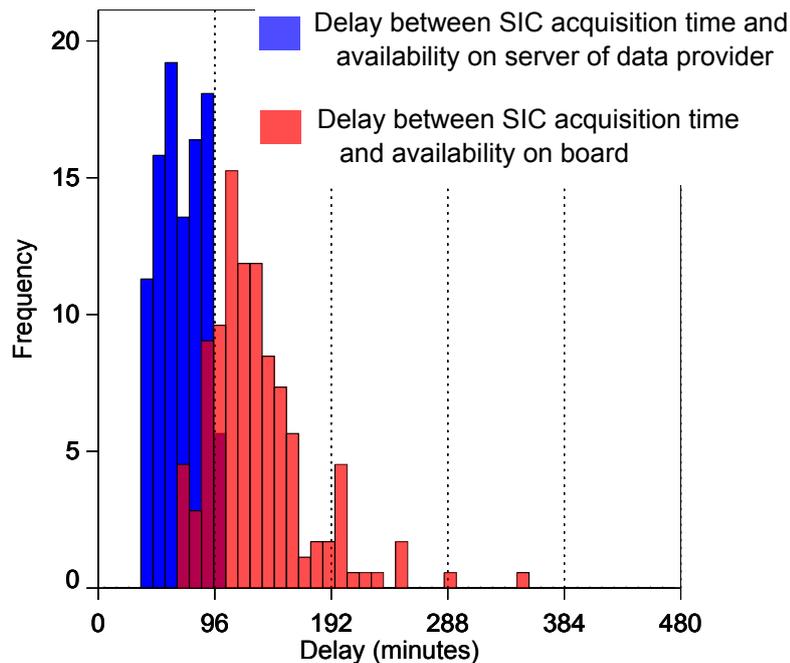


Abbildung 3.3: Häufigkeit von Verzögerungen, mit der die Eiskonzentrationsdaten nach Aufnahme durch den Satellit auf dem Server des Datenproviders verfügbar gemacht werden (blau) bzw. an Bord erhältlich sind (rot) (Quelle: AWI).

Im Schnitt sind Eiskonzentrationen rund 73 Minuten nach Aufnahme auf den FTP Servern von Drift+Noise verfügbar. An Bord gelangen die Daten dann etwa 62 Minuten später (135 Minuten nach Aufnahme). Mögliche Gründe für die verzögerte Auslieferung an Bord werden in Kapitel 4.3.1 beschrieben. Die hohe zeitliche Auflösung der Running-Composite Daten ist insbesondere in Regionen, die von starken Änderungen in der Eisbedeckung oder hohen Eisdriftgeschwindigkeiten charakterisiert sind von Vorteil. Vor allem in Eisrandlagen, wo es zu Eisdriftgeschwindigkeiten von bis zu 40 km pro Tag kommen kann, sind mehrere Bildupdates pro Tag sinnvoll. Bei einer Eisdriftgeschwindigkeit von 40 km wird beispielsweise die Lage der Eiskante um bis zu 6 Pixel verschoben. Diese Prozesse werden in Eiskonzentrationsprodukten, die auf Tagesmittelwerten basieren (Kapitel 2.1.2) nicht aufgelöst. Das Heranziehen von Eiskonzentrationskarten zur strategischen Planung von Operationen im Eis ist allerdings nur in Monaten, in denen es nicht oder kaum zu Eisneubildung (Arktis: Mai - September, Antarktis: November - März) kommt, sinnvoll. Denn die vorherrschende Neueisbildung im Winter in Rinnen und größeren offenen Wasserflächen führt dazu, dass die Eiskonzentration konstant um die 95 - 100 % liegt, und sich somit keine Strukturen mehr erkennen lassen, die für eine strategische Planung hilfreich wären.

Laut einer Studie von Ivanova et al. 2014²⁶, beträgt die durchschnittliche Unsicherheit der Eiskonzentrationsdaten bei 4 % im Winter und 8 % im Sommer. Ein Teil der Unsicherheiten sind auf Interferenzen der gemessenen Temperatur mit Wind und Feuchtigkeit in der Atmosphäre, der sogenannten Opazität, zurückzuführen²⁷. Neben der Opazität gibt es noch eine Reihe weiterer Faktoren, wie saisonale und nicht saisonale Abweichungen der Emissivität des Eises, unterschiedliche radiometrische Signatur verschiedener Eistypen, sowie zufällige und

²⁶Ivanova, N., Johannessen, O. M., Pedersen, L. T., and Tonboe, R. T.: Retrieval of Arctic Sea Ice Parameters by Satellite Passive Microwave Sensors: A Comparison of Eleven Sea Ice Concentration Algorithms, IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING, VOL. 52, 7233–7246, 2014

²⁷Spreen, G.: Meereisfernerkundung mit dem satellitengestützten Mikrowellenradiometer AMSR(-E) - Bestimmung der Eiskonzentration und Eiskante unter Verwendung der 89 GHz-Kanäle, 2004

systematische Instrumentenfehler, die Fehler induzieren können. Im ECS wird die Eiskonzentration in Farbabstufungen von 0-60 % in 15 % Schritten blau-hellgrün, 60-80 % in 10 % Schritten gelb-orange, 80-100 % in 5 % Schritten rot-violett dargestellt. Somit ist in den Sommermonaten die Unsicherheit des Datenprodukts (8 %) höher als die Farbabstufung im oberen Konzentrationsbereich (5 %), wodurch es zu Fehlinterpretationen kommen kann. Um dies auszuschließen, setzt die Anwendung von Eiskonzentrationsdaten für die Entscheidungsfindung an Bord zwingend die Kenntnis der oben genannten Unsicherheiten voraus.

3.3 SAR Satelliten

Das IceGIS wurde im Juni 2016 erstmalig auf einer Arktisfahrt getestet. An Bord geliefert und im ECS visualisiert, wurden ausschließlich Daten der Sentinel-1 Mission (siehe Kapitel 2.1.3). TerraSAR-X Daten wurden nicht bezogen, weshalb sich im folgenden die Evaluierung der Anwendbarkeit von SAR Daten für den Entscheidungsfindungsprozess an Bord auf Szenen der ESA Sentinel-1 Mission beschränkt. Die Bereitstellung von Sentinel-1 Daten erfolgt durch Drift+Noise. Die Firma überprüft regelmäßig den Abdeckungsbereich neu aufgenommener Szenen. Falls eine neue Szene über der aktuellen Schiffsposition verfügbar ist, wird diese heruntergeladen, prozessiert, zugeschnitten und via FTP dem Schiff bereit gestellt. Dies ist ein kontinuierlicher Prozess der Bilder sowohl in der Arktis als auch in der Antarktis liefern kann. Allerdings ist die Aufnahmefrequenz in bestimmten Regionen höher als in anderen. Dies ist der Umlaufbahn, der Aufnahmegeometrie und dem Aufnahmeplan der Sentinel-1 Satelliten geschuldet. Abbildung 3.4 zeigt anhand eines zufällig gewählten aber repräsentativen Tages (16. April 2017) die Anzahl der verfügbaren Aufnahmen.

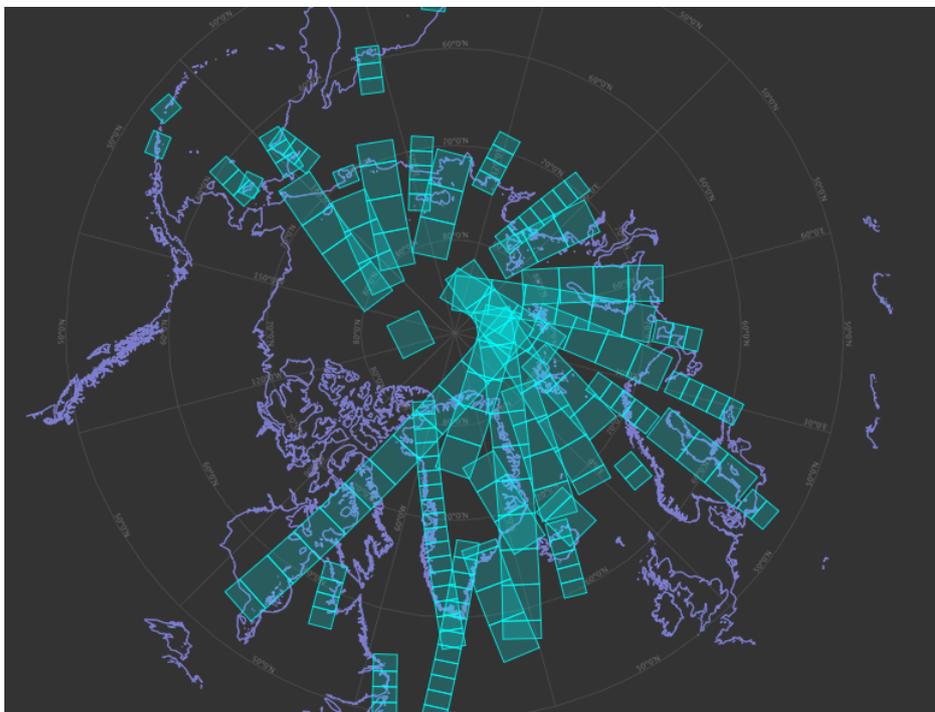


Abbildung 3.4: Anzahl der Sentinel-1 Bilder, die an einem zufällig gewählten Tag (hier 16. April 2017) über der Arktis aufgenommen wurden (Quelle: polarview.aq). Mehrere Aufnahmen am Tag sind in der Nordostpassage, der zentralen Arktis und insbesondere der Framstraße erhältlich.

Deutlich zu erkennen ist eine fast durchgehende Abdeckung insbesondere im Bereich der Framstraße, Karasee bis zur Vilkitzky-Straße. In der Framstraße ist ein Häufungsbereich zu erkennen, der einen Bezug von bis zu 4 Bildern an diesem Tag für diese Region erlaubt hätte. In der westlichen Arktis werden nur vereinzelt Aufnahmen getätigt. In der Antarktis werden vor allem Aufnahmen über dem Weddell-Meer bereitgestellt (hier nicht gezeigt). Andere Regionen der Antarktis werden nur unregelmäßig abgedeckt.

SAR Bilder liefern Anwendern durch ihre hohe Auflösung und die Darstellung in Graustufen einen guten Überblick über die Eissituation. Offene Wasserflächen erscheinen in den Bildern schwarz und heben unter günstigen Bedingungen einzelne Schollen hervor. Abbildung 3.5 zeigt einen Screenshot des ECS, in dem eine aktuelle Sentinel-1 Aufnahme zusammen mit dem sigma S6 Ice Navigator dargestellt wird.

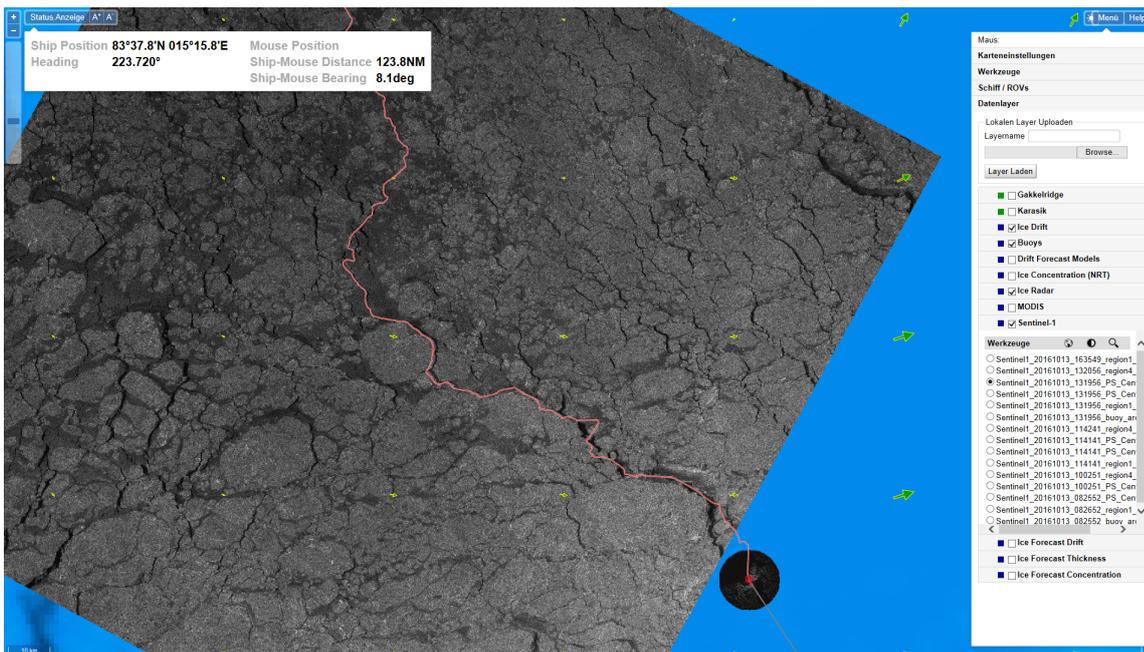


Abbildung 3.5: Screenshot des ECS Systems, in dem eine Sentinel-1 Aufnahme zusammen mit dem Radarbild des sigma S6 Ice Navigators dargestellt wird. Die rote Linie zeigt die zurückgelegte Schiffsroute. Die grünen Vektoren bilden die Eisdrift der vergangenen 48 Stunden ab (siehe Kapitel 3.4).

Bei den dunkelgrauen Zonen handelt es sich in diesem Fall um vornehmlich junges undeformiertes Eis. Gut erkennbar sind auch größere ältere Schollen, die eine hellere Signatur aufweisen. Älteres Eis erzeugt hier durch die höhere Oberflächenrauigkeit eine stärkere Rückstreuung. Ebenfalls gut zu erkennen sind die Fahrrinnen (hier schwarz).

Anhand der Abbildung 3.6 ist leicht nachvollziehbar, dass das bildgebende Verfahren von SAR im Wesentlichen dem eines Schiffsradars ähnelt. So lassen sich einzelne Schollenstrukturen oder starke Deformationszonen auch auf den SAR Szenen identifizieren.

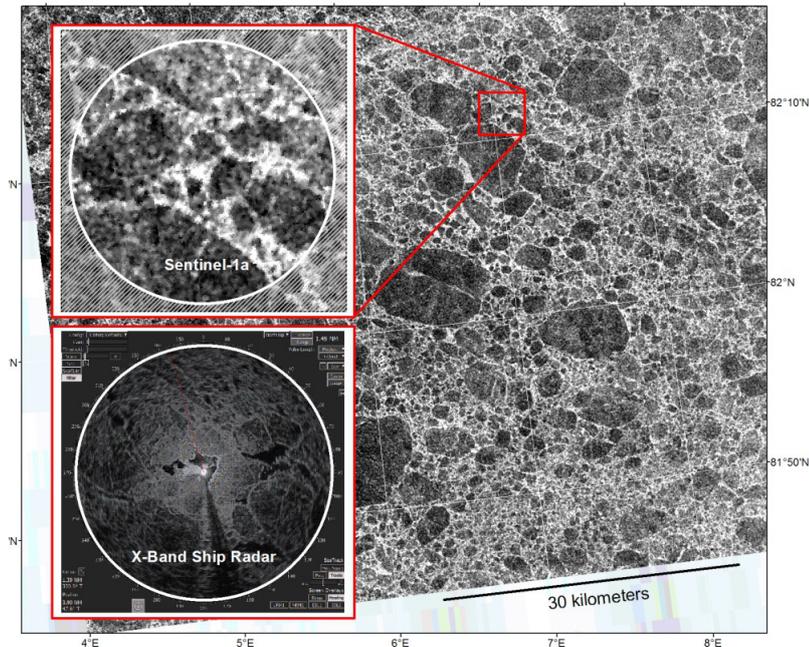


Abbildung 3.6: Sentinel-1 Aufnahme im Vergleich zur Abbildung der Eisoberfläche des sigma S6 Ice Navigators (Quelle: AWI). In der Vergrößerung des SAR Bildes lassen sich die selben Schollenumrisse wie im sigma S6 Ice Navigator erkennen. Als deutlicher Vorteil von SAR zeigt sich der erheblich größere Abdeckungsbereich der Sentinel-1 Aufnahme.

Mit Einsetzen der Schmelzperiode im arktischen und antarktischen Sommer erschweren jedoch Verschleiereffekte die Interpretation der SAR Bilder. Die Bildung von Schmelztümpeln, und weiteren physikalischen Veränderungen des abschmelzenden Eises und dessen Schneedecke, dämpfen das rückgestreute Radarsignal stark und erschweren die Identifikation von verschiedenen Eistypen und Deformationszonen.

Ob sich eine Aufnahme zur taktischen oder strategischen Entscheidungsfindung heranziehen lässt, hängt maßgeblich von der Verzögerung, mit der die Bilder nach ihrer Aufnahme an Bord zur Verfügung stehen, ab. Abbildung 3.7 zeigt die Verzögerung zwischen Bildaufnahme, Verfügbarkeit auf dem Server von Drift+Noise und Verfügbarkeit an Bord.

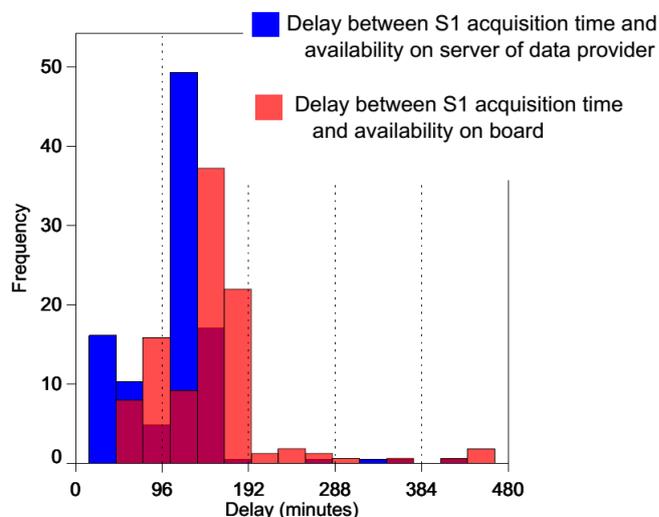


Abbildung 3.7: Häufigkeit von Verzögerungen, mit der die Sentinel-1 Daten nach Aufnahme durch den Satellit auf dem Server des Datenproviders verfügbar gemacht werden (blau) bzw. an Bord erhältlich sind (rot) (Quelle: AWI).

Im Schnitt werden Aufnahmen, die in der Arktis getätigt werden, innerhalb von 135 Minuten zum Upload auf dem Drift+Noise Server angeboten. An Bord erhältlich sind sie dann rund 30 Minuten später (165 Minuten nach Aufnahme). Die echtzeitnahe Lieferung der Daten ist besonders wichtig, wenn die Daten für taktische Entscheidungsfindungen Anwendung finden sollen. Denn schon unter moderaten Eisdriftbedingungen entsteht, bedingt durch die Verzögerung zwischen Aufnahme und Verfügbarkeit, ein Versatz der Bilder zur tatsächlichen Position der abgebildeten Eisfläche von mehreren hundert Metern. Werden die Daten für die Identifikation von Fahrrinnen verwendet, muss dieser Versatz bei der Bildinterpretation durch die Nautiker entsprechend berücksichtigt werden.

Die im IceGIS von der nautischen Schiffsführung genutzten SAR Bilder haben eine Auflösung von 100 *m* mit einem Bildzuschnitt auf 200 *km* um die jeweilige Schiffsposition sowie 50 *m* mit einem Zuschnitt von 100 *km*. Um unnötig hohe Datenmengen zu vermeiden, wird die Auflösung den jeweiligen Bedürfnissen angepasst und Bereiche außerhalb des Interessenbereiches weggeschnitten. Über ein User Interface (framsat.driftnoise.com) können Anwender zudem vor Fahrtbeginn zusätzliche Regionen definieren, über denen die Verfügbarkeit von Sentinel-1 Szenen geprüft werden soll. Diese Daten werden ebenfalls bei Bedarf an das Schiff übermittelt, um gegebenenfalls die Zugänglichkeit eines bestimmten Gebietes im Vorfeld überprüfen zu können.

Während der Einführungsphase des IceGIS lieferten SAR Bilder, durch ihren großen hochauflösenden Überblick, regelmäßig die Grundlage für taktische und strategische Entscheidungen. Größere Schollen, starke Deformationszonen und mehrjähriges Eis lassen sich mit etwas Hintergrundwissen schnell erkennen und gezielt umfahren. Ihren taktischen Nutzen bewiesen die SAR Bilder mehrfach während der Einführungsphase. Im Vorfeld eines Transits veranschlagte die Schiffsführung auf Grundlage von Erfahrungswerten eine Fahrtdauer von 3 Tagen. Durch die taktische Nutzung aktueller SAR Bilder ließen sich große Schollengebilde gezielt umfahren und so die Fahrtzeit auf 1,5 Tage verkürzen. Aber auch für die strategische Einsatzplanung liefern SAR Bilder wertvolle Informationen. So konnte mittels SAR Daten die Position einer zu bergenden autonom arbeitenden Wetterstation auf einer 20 *km* großen Scholle eingegrenzt werden. Die Kenntnis der genauen Position auf der Scholle ermöglichte es der Schiffsführung einen optimalen Anfahrtsweg und Anlegepunkt für die Bergung zu wählen. Ebenfalls Anwendung finden SAR Bilder bei der Planung von Erkundungsflügen. Diese werden in regelmäßigen Abständen mit dem bordeigenen Helikopter durchgeführt und sollen den Offizieren einen Überblick über die Eissituation im direkten Umfeld des Schiffes ermöglichen. Mit Hilfe der SAR Daten lassen sich vorab gezielt Gebiete bestimmen, die angefliegen werden sollen. So werden Helikoptereinsätze auf ein notwendiges Minimum reduziert.

3.4 Eisdrift aus passiven Mikrowellendaten

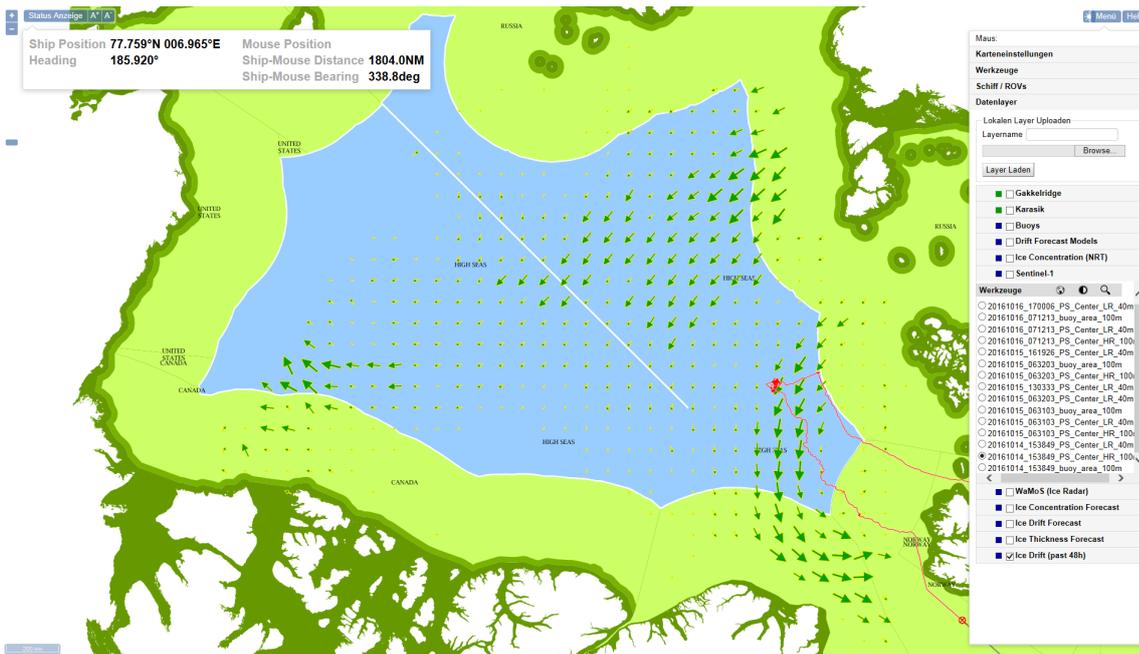


Abbildung 3.8: Darstellung der OSI-405c Daten (grüne Vektoren) im IceGIS. Als Hintergrund ist eine Karte mit Grenzen der ausschließlichen Wirtschaftszonen (AWZ) eingestellt. Diese sind von Interesse, da nur mit Forschungsgenehmigung, der jeweiligen Länder, der Eintritt in die AWZ erlaubt ist.

Das im IceGIS dargestellte Eisdriftprodukt OSI-405c wird von OSI-SAF (EUMETSAT) zur Verfügung gestellt. OSI-405c beinhaltet Vektordaten über die Eisdrift der vergangenen 48 Stunden. Das Produkt wird von EUMETSAT operationell hergestellt und täglich gegen 0200 Uhr UTC an Bord mit einer Verzögerung von 2 Stunden übertragen. Bei dem Produkt handelt es sich um ein Multi-Sensor-Produkt, es wird also aus verschiedenen Produkten generiert (siehe auch Beschreibung in Kapitel 2.1.4). Bedingt durch das Verfahren zur Ableitung der Eisdrift, ist das Produkt mit $62,5 \text{ km}$ sehr grob aufgelöst²⁸. Das bedeutet, dass jeder Vektor die Bewegung eines Eisfeldes von $62,5 \times 62,5 \text{ km}$ repräsentiert. Folglich wird nicht die Drift einzelner Schollen aufgelöst, sondern vielmehr die Bewegung größerer Flächen. Die Driftdaten von OSI-SAF sollen an Bord einen Überblick über die großskalige Bewegung des Packeises bieten. Aus den Daten lässt sich in einem weiteren Schritt die Divergenz/Konvergenz ableiten. Diese gibt Auskunft darüber, ob eine Region in den vergangenen 48 Stunden durch ein auseinanderdriftendes Eisfeld dominiert wurde oder ob die Eisdriftbewegung gegensätzlicher Natur war. Denn gegensätzliche Eisdriftbewegung erzeugt Spannungen und Druck im Eis, welche die Durchfahrt für den Eisbrecher erschweren oder unmöglich machen. Für die Ableitung der Divergenzrate ist allerdings derzeit noch ein separater Prozessierungsschritt an Bord nötig, dessen Output noch nicht in das IceGIS importiert werden kann. Zudem werden die Vektordaten als Overlay auf aktuellen SAR Bildern angewendet (siehe Abbildung 3.5), um eine erste grobe Abschätzung über den potentiellen Versatz der SAR Szenen relativ zur Schiffposition zu erhalten. Der Versatz wird durch die Zeitdifferenz zwischen Bildaufnahme und -auslieferung induziert (siehe Kapitel 3.3).

In der Wissenschaft finden die Driftdaten Anwendung in Modellen, bei der Analyse von Ei-

²⁸Lavergne, T.: Algorithm Theoretical Basis Document for the OSI SAF Low Resolution Sea Ice Drift Product, Tech. rep., OSI SAF, 2015b

sursprung und Driftpfaden sowie der Berechnung von Volumenflüssen ²⁹. Im Rahmen solcher Studien wurde auch die Genauigkeit der Driftinformation mittels eines Vergleichs mit Daten von Driftbojen untersucht. Diese Studien zeigen, dass ein wesentlicher Faktor der die Genauigkeit der Driftprodukte beeinflusst, die vorherrschende Eiskonzentration, Eisdicke und die Driftgeschwindigkeit selber ist. So weicht in Gebieten mit niedriger Eiskonzentration und geringer Eisdicke die satellitenbasierte Driftinformation stärker von den Beobachtungen ab, als in Regionen, die durch hohe Eiskonzentrationen gekennzeichnet sind und größere Eisdicken aufweisen ³⁰. Hohe Driftgeschwindigkeit ziehen ebenfalls größere Unsicherheiten nach sich ³¹. Laut einer Studie von Sumata et al. (2014) ³² weist das an Bord verwendete Driftprodukt OSI-405c, im Vergleich zu anderen gängigen Produkten, die kleinste Unsicherheit (1.6 km/Tag) auf. Die angegebene Unsicherheit gilt für die Wintermonate. In den Sommermonaten beeinflussen Schmelzprozesse an der Oberfläche die Genauigkeit der abgeleiteten Driftprodukte. Daher kann es in dieser Zeit zu erheblichen Datenlücken kommen, die teilweise großzügig interpoliert werden. Die Datenprovider versuchen durch die Anwendung niederfrequenter Kanäle ($36,5$ und $18,7 \text{ Ghz}$) bei der Ableitung der Drift den atmosphärisch bedingten Einfluss zu minimieren. Das Produkt OSI-405c beinhaltet erst seit Kurzem eine Eisdriftinformation während der Sommermonate. Die Genauigkeit dieser Driftinformationen wurde bis dato jedoch nicht hinreichend genau untersucht. Andere Eisdriftprodukte die die Sommermonate abdecken, wie die des National Snow and Ice Data Center (NSIDC, USA) zeigen jedoch deutlich erhöhte Unsicherheiten von bis zu $2,9 \text{ km/Tag}$. Es ist daher davon auszugehen, dass auch das Driftprodukt OSI-405c einer höheren Unsicherheit im Sommer unterliegt.

3.5 Modelldaten aus gekoppeltem Meereis-Ozeanmodell

Das vom Nansen Environmental and Remote Sensing Center (NERSC) entwickelte gekoppelte Eis-Ozeanmodell TOPAZ4, liefert auf Basis einer wöchentlichen Assimilation von verschiedenen Parametern täglich eine 10-tägige Vorhersage. Die Assimilation geschieht Donnerstags. Die täglichen Modellläufe werden dann durch aktuelle Vorhersagen der Atmosphäre angetrieben. Das Modell liefert eine Reihe von Parametern. Um an Bord übermittelte Datenmengen gering zu halten, werden lediglich für den Entscheidungsfindungsprozess relevanten Informationen der nächsten 5 Tage übermittelt. Erhältlich ist also eine 5-tägige Vorhersage der Eiskonzentration, Eisdrift und Eisdicke. Die Vorhersage deckt dabei die gesamte Arktis nördlich von 65°N ab. Die räumliche Auflösung der TOPAZ4 Daten beträgt 12.5 km . Vorhersagen für die Antarktis sind nicht verfügbar. Die Vorhersagedaten stehen ab 0100 Uhr UTC auf der Anbieterseite zur Verfügung und sind gegen 0300 Uhr UTC an Bord erhältlich. Die Bereitstellung, Zuschnitt und Reduzierung des Vorhersagehorizonts erfolgt durch die Firma Drift+Noise.

²⁹Kruppen, T., Gerdes, R., Haas, C., Hendricks, S., Herber, A., Selyuzhenok, V., Smedsrud, L., and Spreen, G.: Recent summer sea ice thickness surveys in Fram Strait and associated ice volume fluxes, *The Cryosphere*, 10, 523–534, doi: 10.5194/tc-10-523-2016, 2016

³⁰Sumata, H., Lavergne, T., Girard-Ardhuin, F., Kimura, N., Tschudi, M. A., Kauker, F., Karcher, M., and Gerdes, R.: An intercomparison of Arctic ice drift products to deduce uncertainty estimates, *J. Geophys. Res. Oceans*, 119, 4887–4921, doi: 10.1002/2013JC009724, 2014

³¹Sumata, H., Lavergne, T., Girard-Ardhuin, F., Kimura, N., Tschudi, M. A., Kauker, F., Karcher, M., and Gerdes, R.: An intercomparison of Arctic ice drift products to deduce uncertainty estimates, *J. Geophys. Res. Oceans*, 119, 4887–4921, doi: 10.1002/2013JC009724, 2014

³²Sumata, H., Lavergne, T., Girard-Ardhuin, F., Kimura, N., Tschudi, M. A., Kauker, F., Karcher, M., and Gerdes, R.: An intercomparison of Arctic ice drift products to deduce uncertainty estimates, *J. Geophys. Res. Oceans*, 119, 4887–4921, doi: 10.1002/2013JC009724, 2014

Die Bereitstellung der Modellvorhersagen zur Unterstützung der Entscheidungsfindung an Bord hat derzeit noch einen experimentellen Charakter. Bis dato wurden die Daten wesentlich durch Wissenschaftler verwendet, prinzipiell bieten aber insbesondere die Driftdaten eine hilfreiche Zusatzinformation über die großskalige Dynamik in den kommenden Tagen. Mit Hilfe der Driftvorhersage lassen sich prinzipiell auch großräumige Kompressionszonen vorher-sagen, wenngleich die Verlässlichkeit dieser Information nicht überprüfbar ist. Des Weiteren können in Kombination mit der Eiskonzentrationsvorhersage Aussagen über Änderungen der Eisrandlage getroffen werden. Die Information kann hilfreich sein, wenn der Kontakt mit Eis generell vermieden werden soll. Die Unsicherheiten der Eiskonzentrationsvorhersage zeigt der Vergleich der TOPAZ4 Vorhersage mit Composite Eiskonzentrationskarten in Abbildung 3.9 ³³. Im Mittel unterliegen die Daten einer Unsicherheit (im Bereich der Framstraße und Barentssee) von 18 % (0,18/1).

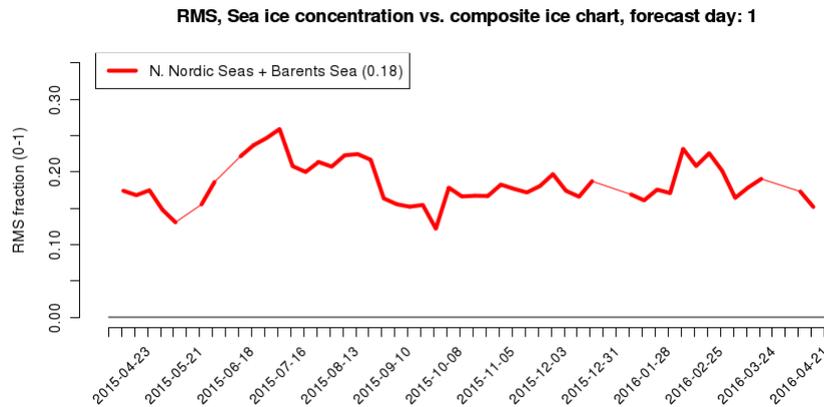


Abbildung 3.9: Vergleich der TOPAZ4 Eiskonzentrationsvorhersage, für Framstraße und Barentssee, mit Composite Eiskonzentrationskarten (Quelle: Melsom et al., 2016).

Während der Fahrt PS101 (Oktober 2016) wurde die Anwendung der Driftdaten für eine Abschätzung der freien Schiffsdrift im Eis geprüft. Unter der Annahme, dass die Schiffsdrift sich im Wesentlichen nicht von der Eisdrift unterscheidet, wurde fortlaufend die Schiffspositionen für die nächsten 48 Stunden berechnet. Da die Unsicherheiten des Driftprodukts allerdings im Vergleich zu satellitenbasierten Eisdriftdaten relativ hoch sind, sind die TOPAZ4 Daten nicht oder nur bedingt für eine Schiffsdriftvorhersage einsetzbar. Die Unsicherheiten der TOPAZ4 Driftvorhersagen werden in Abbildung 3.10 ³⁴ gezeigt. Die Unsicherheitsabschätzung basiert auf einen Vergleich von TOPAZ4 Vorhersagen mit aus SAR Daten ermittelter Eisdrift. Die gemittelten Unsicherheiten der TOPAZ4 Driftdaten für Tag 1 der Vorhersage liegen in etwa bei 5,1 *km/Tag* und sind damit fast viermal so hoch wie aus passiven Mikrowellen abgeleitete Driftinformationen (siehe Kapitel 3.4). Es ist davon auszugehen, dass die Unsicherheiten in Abhängigkeit der Region, der Eiskonzentration, dem Vorhersagehorizont und der Driftgeschwindigkeit starken Schwankungen unterliegen können.

³³Melsom, A., Simonsen, M., Bertino, L., Hackett, B., Waagbø, G. A., and Raj, R.: QUALITY INFORMATION DOCUMENT For Arctic Ocean Physical Analysis and Forecast Product, 2016

³⁴Melsom, A., Simonsen, M., Bertino, L., Hackett, B., Waagbø, G. A., and Raj, R.: QUALITY INFORMATION DOCUMENT For Arctic Ocean Physical Analysis and Forecast Product, 2016

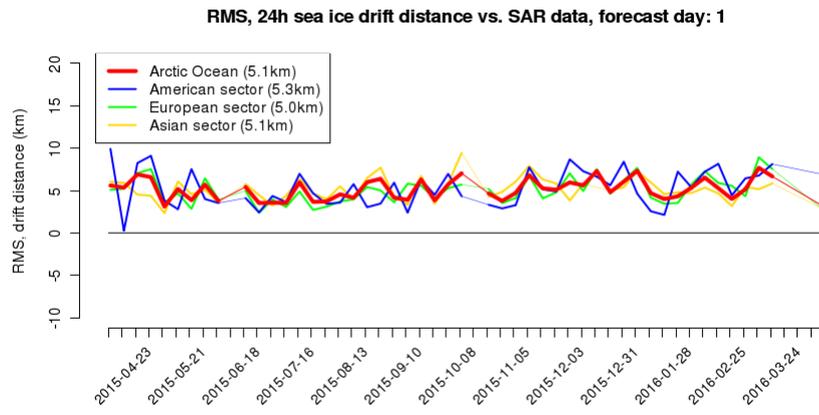


Abbildung 3.10: Vergleich der TOPAZ4 Eisdriftvorhersagen, für den amerikanischen, asiatischen und europäischen Sektor der Arktis, mit aus SAR Daten ermittelter Eisdrift (Quelle: Melsom et al., 2016).

4. Diskussion

4.1 Diskussion der Anwendbarkeit von Satelliten- und Modelldaten

In Kapitel 3 wurde die Anwendbarkeit der einzelnen vorgestellten Datenprodukte erläutert. Grundlage für die Bewertung ist unter anderem die Echtzeitnähe, mit der die Daten an Bord verfügbar sind, die Auflösung, die Anwendbarkeit für die taktische und strategische Entscheidungsfindung und die Unsicherheiten der Datenprodukte.

In der Tabelle 4.1 werden die Ergebnisse zusammengefasst und den Eiseigenschaften, die das Vorankommen des Schiffes im Eis maßgeblich beeinflussen, gegenübergestellt.

		Datenprodukte						
		Wettersatellitendaten	Eiskonzentration	SAR Sentinel-1	Eisdrift (48 Std.)	TOPAZ4 5-Tages Eisvorhersage		
						Eiskonzentration	Eisdrift	Eisdicke
Auflösung		1,1 km	6,25 km	50 m	62,5 km	12,5 km	12,5 km	12,5 km
Verfügbarkeit		bis 12 x / Tag	bis 8 x / Tag	bis 4 x / Tag	1 x / Tag	1x / Tag	1 x / Tag	1 x / Tag

Anwendbarkeit für strategische Planung in Abhängigkeit der Auflösung								
Eiseigenschaften	Eisdicke			bedingt geeignet				geeignet
	Porosität							
	Schneeaufflage							
	Fahrrinnen / Eisbedeckung	bedingt geeignet	geeignet	geeignet		geeignet		
	Eispressung			geeignet	geeignet		geeignet	
	Presseisrücken			geeignet				

Anwendbarkeit für taktische Planung in Abhängigkeit der Auflösung								
Eiseigenschaften	Eisdicke			bedingt geeignet				
	Porosität							
	Schneeaufflage							
	Fahrrinnen / Eisbedeckung	bedingt geeignet	geeignet	geeignet				
	Eispressung			geeignet				
	Presseisrücken			geeignet				

bedingt geeignet	geeignet	ungeeignet
------------------	----------	------------

Tabelle 4.1: Gegenüberstellung der unterschiedlichen Satelliten- und Modelldatenprodukte hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit für die Ableitung verschiedener Eiseigenschaften. Die hier genannten Eiseigenschaften beeinflussen maßgeblich die Befahrbarkeit einer Packeiszone.

Die Anwendbarkeit wird für die zwei unterschiedlichen Zeiträume der Anwendung getrennt betrachtet: Strategische (also mittelfristige/wöchentliche) und taktische (also kurzfristige/ta-

gesbasierte) Anwendungen. Die Anwendbarkeit eines Datenprodukts zur Ableitung von Eiseigenschaften ist abhängig von der jeweiligen räumlichen Auflösung des Produkts. So können Sentinel-1 Szenen, die mit einer räumlichen Auflösung von bis zu 50 Metern verfügbar sind, zwar für die Erkennung größerer Ansammlungen von Presseisrücken herangezogen werden, der Verlauf einzelner Rücken ist jedoch nicht erkennbar. Hierfür sind deutlich höher auflösende Satelliten wie der TerraSAR-X des DLR's notwendig (siehe Kapitel 2.1.3). Genauso lässt sich zwar der Eisbedeckungsgrad in Abwesenheit von Wolken, aus Wettersatellitendaten entnehmen, die Erkennung einzelner schmaler Fahrrinnen ist aber nur mit hochaufgelösten bildgebenen Verfahren möglich. Aus der Tabelle 4.1 wird ersichtlich, dass sämtliche Produkte mit geringer räumlicher Auflösung (mehr als 1 km) sich lediglich für die Ableitung einer einzelnen Eiseigenschaft eignen. So bieten Wettersatelliten- und Eiskonzentrationsdaten lediglich Informationen über den Eisbedeckungsgrad.

Ob ein Produkt den taktischen Entscheidungsfindungsprozess unterstützen kann hängt von der zeitlichen Auflösung ab. Produkte, die mehrfach am Tag aktualisiert werden, sind hier zuträglich. Daten, die einmal am Tag mit einer hohen zeitlichen Verzögerung das Schiff erreichen, können ausschließlich bei strategischen Entscheidungsfindungsprozessen herangezogen werden. So sind die Eisvorhersagen einzig bei der strategischen Planung hilfreich und bleiben bei taktischen Entscheidungen unberücksichtigt.

SAR Systeme bieten das größte Anwenderspektrum. Die zeitlich und räumlich hochaufgelösten Daten ermöglichen es dem geschulten Anwender eine Vielzahl an Informationen abzuleiten. Hierzu gehört sowohl die Identifikation verschiedener Eistypen, was eine eingeschränkte Aussage über die Eisdicke ermöglicht, als auch der Bestimmung der Lage von schmalen Fahrrinnen und dem Vorhandensein von Presseisrücken. Aus einer Abfolge mehrerer Bilder lässt sich zudem die Eisdrift erkennen und somit Zonen, die einer starken Pressung unterliegen, identifizieren. Diese Informationen dienen sowohl der taktischen, als auch der strategischen Entscheidungsfindung und sind sicherlich aus dem gegenwärtigen Schiffsbetrieb nicht mehr wegzudenken. In Kapitel 3.3 konnte aber auch gezeigt werden, dass die Anwendbarkeit für taktische Entscheidungen maßgeblich von der Verzögerung abhängt, mit der die Sentinel-1 Daten zur Verfügung stehen. Denn schon unter moderaten Eisdriftbedingungen entsteht, bedingt durch die Verzögerung zwischen Aufnahme und Verfügbarkeit, ein Versatz der Bilder zur tatsächlichen Position der abgebildeten Eisfläche von mehreren hundert Metern. Werden die Daten für die Identifikation von Fahrrinnen verwendet, muss dieser Versatz bei der Bildinterpretation durch den wachhabenden Offizier entsprechend berücksichtigt werden. Dieser Versatz kann prinzipiell mittels einer Bildkorrelation mit dem sigma S6 Ice Navigator an Bord korrigiert werden. Die automatische Korrektur der Sentinel-1 Daten ist Gegenstand laufender Forschungsarbeiten und würde die Anwendbarkeit der Sentinel-1 Bilder weiter verbessern.

Keines der an Bord verfügbaren Produkte lässt Rückschlüsse auf die Porosität des Eises oder die Dicke der Schneeeauflage zu, hier mangelt es an verlässlichen Algorithmen. Mit Hilfe der verfügbaren Datenprodukte lassen sich also nicht alle für die Befahrbarkeit von Packeis zonen ausschlaggebenden Eiseigenschaften ableiten.

4.2 Verbesserung der Anwendbarkeit durch die Visualisierung im MapViewer

Der MapViewer visualisiert sowohl Satelliten- und Modelldaten als auch schiffsbasierte Sensordaten. Jedes der verfügbaren Satelliten- und Modelldatenprodukte liefert Informationen

zu einer begrenzten Anzahl an Eiseigenschaften zu einem bestimmten Zeitpunkt oder für einen bestimmten Zeitraum. Durch die anpassbare Abfolge der Datenlayer und der wahlweise transparenten Darstellung der Layer im MapViewer, lassen sich Daten kombiniert darstellen und deren Information verschneiden. SAR Szenen zeigen die Eisbedeckung eines Gebietes zu einem Zeitpunkt der mehrere Stunden zurückliegt. Wohin dieses Eisfeld jedoch gedriftet ist oder driften wird, lässt sich aus dem Bild nicht ableiten. So ist bei einer kombinierten Darstellung von SAR Szene und Eisdrift ein ungefährender Versatz grob abschätzbar und eine Informationslücke der SAR Szene ausgefüllt.

4.3 Einschränkungen durch technische Gegebenheiten

Im technischen Ablauf, also bei der Datenübermittlung und Visualisierung, kann es zu Störungen kommen, die sich nachhaltig auf die Anwendbarkeit der Datenprodukte für die Navigation auswirken. Die Anbindung an Kommunikationssatelliten ist hier ein kritischer Punkt, da ohne Kommunikationsanbindung auch die Datenübertragung an Bord nicht möglich ist. Im Folgenden wird daher kurz auf die existierenden Einschränkungen durch technische Gegebenheiten eingegangen.

4.3.1 Datenverbindung

Während des Einsatzes in polaren Regionen wird für die Sprach- und Datenkommunikation auf Kommunikationssatelliten zurückgegriffen. In Bereichen nördlich von 80° N geschieht die Kommunikation ausschließlich über Iridium. Iridium ist ein weltumspannendes Satellitenkommunikationssystem, das, im Gegensatz zu anderen Anbietern, mit Hilfe von polumlaufenden Satelliten Sprach- und Datenverbindungen aufbaut. Die Umlaufbahn der Iridium Satelliten ermöglicht es Anwendern auch in Polregionen, jenseits der Erreichbarkeit von geostationären Kommunikationssatelliten, auf den Service von Iridium zurückzugreifen. Der tägliche Bedarf an Datenvolumen, der für den Betrieb des IceGIS notwendig ist, stellt sich folgendermaßen zusammen:

- Eiskonzentration: Maximal 1 *MB/Tag* bei 8 Updates
- SAR Bilder: Etwa 10 *MB/Tag* bei 3 Updates
- zusätzlich angeforderte SAR Bilder: Etwa 10 *MB/Tag* bei 3 Updates
- Eisdrift aus passiven Mikrowellen: 0,7 *MB/Tag*
- Modellvorhersagen: 5 *MB/Tag*
- Bojenpositionen: 1 *MB/Tag*

Insgesamt ergibt sich so ein täglicher Bedarf von mindestens 27,7 *MB/Tag* und ein Mindestbedarf von 831 *MB* pro Monat. Somit geht der Betrieb des IceGIS mit einem sehr hohen Bedarf an Datenvolumen und den entsprechenden Kosten einher. Die Pickup Software (siehe Kapitel 2.2) des IceGIS prüft alle 15 Minuten die jeweiligen FTP Server der Datenanbieter auf Updates und lädt diese dann gegebenenfalls herunter. Während der Kommunikation und Datenübertragung zwischen Pickup Software und den FTP Servern über die Iridium Verbindung kam es immer wieder zu Verbindungsabbrüchen, deren Anzahl teilweise stark schwankte. Zur Wiederaufnahme eines angefangenen Downloads muss erneut eine Verbindung zum jeweiligen

FTP Server aufgebaut werden, was einige Sekunden in Anspruch nimmt. Eine Häufung von Verbindungsabbrüchen hat teilweise zu hohen Verzögerungen bei der Versorgung mit SAR Bildern (siehe Abbildung 3.7) und Eiskonzentrationsdaten (siehe Abbildung 3.3) geführt, deren Nutzen maßgeblich von einer echtzeitnahen Verfügbarkeit abhängt.

Eine Optimierung der Verbindung und der Größe der zu übermittelnden Daten, sind potenzielle Punkte, mittels derer die Echtzeitnähe der SAR Bilder und der Running-Composite Eiskonzentrationskarten verbessert werden könnte.

4.3.2 IT Infrastruktur

Das IceGIS System an Bord der Polarstern basiert auf einem GeoServer, der die eingehenden Daten bündelt und der Visualisierung im MapViewer übergibt. Prinzipiell sind beide Systeme Neuentwicklungen. Das bedeutet, dass es zu Ausfällen oder Fehlern kommen kann, die den Betrieb nachhaltig stören. Die Überwachung des Systems ist Aufgabe des IT Spezialisten an Bord. Im Anschluss an die Fahrt werden aufgetretene Fehler identifiziert und Ursachen behoben. So unterliegt das System einer fortlaufenden Verbesserung.

5. Zusammenfassung

Ziel dieser Arbeit ist, die auf dem Forschungseisbrecher Polarstern verfügbaren Modell- und Satellitendaten hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit als Grundlage für nautische Entscheidungsfindungsprozesse zur Planung und Durchführung von Einsätzen im Packeis zu beurteilen. Die Daten stammen von verschiedenen Providern und werden über das bordeigene ECS System (das IceGIS) automatisch übermittelt. In dieser Arbeit werden zunächst die verfügbaren Datenprodukte beschrieben und im Weiteren deren potenzielle Anwendung zur Planung und Durchführung von Einsätzen in eisbedeckten Gewässern aufgeführt. Die Analyse setzt sich kritisch mit den gegebenen Unsicherheiten und Einschränkungen der jeweiligen Datenprodukte auseinander und zeigt so die Grenzen der Anwendbarkeit auf.

Unter den Satellitendaten, weisen SAR Szenen, wie die der Sentinel-1 Mission oder TerraSAR-X, das größte Nutzerpotential auf. Die Anwendung der hochaufgelöseten SAR Bilder für nautische Anwendungen ermöglichen der Schiffsführung sich zeitnah einen Überblick über die Eissituation in Schiffsnähe zu verschaffen. Da sich für die Befahrbarkeit relevante Eisinformationen wie Eisdrift, Eisalter und das Vorhandensein von Deformationsstrukturen aus den Daten ableiten lassen, tragen sie entscheidend zur taktischen und strategischen Planung bei. Bedingt durch die Verzögerung zwischen Bildaufnahme und Verfügbarkeit an Bord, kommt es zum Versatz der Aufnahmen. Dies muss durch den Anwender berücksichtigt werden und kann bei hohen Driftgeschwindigkeiten die Anwendbarkeit des Produkts einschränken. Anhand von Wettersatellitendaten lässt sich der Grad der Eisbedeckung erkennen. Die hohe Bewölkungsdichte in der Arktis und Antarktis, insbesondere während des Einsatzes in den jeweiligen Gebieten, vermindert jedoch die Anwendbarkeit von Wettersatellitendaten stark. Anhand der räumlich niedrig aufgelöseten jedoch großräumig abdeckenden Eiskonzentrationskarten und Eisdriftdaten der vergangenen 48 Stunden, lässt sich die Zugänglichkeit von Zielgebieten ableiten. Somit bieten die Daten entscheidende Informationen zur Planung von Operationen im Eis. Insbesondere die zeitlich hochaufgelöseten und echtzeitnah verfügbaren Running-Composite Eiskonzentrationsdaten, liefern Informationen zur gegebenenfalls kurzfristig veränderten Eisbedeckung und der damit verbundenen Zugänglichkeit. Das Heranziehen von Modellvorhersagen zu strategischen Entscheidungen ist, bedingt durch die hohen Unsicherheiten, sehr begrenzt, dennoch bieten die Daten hilfreiche Informationen, um die mittelfristige Entwicklung der Eissituation in Zielgebieten abzuschätzen.

Die Analyse der Datenprodukte zeigt deutlich, dass insbesondere die räumliche und zeitliche Auflösung der Daten für eine taktische Anwendung entsprechend hoch sein muss. Produkte, die nur auf täglicher Basis zur Verfügung stehen und von geringerer Auflösung sind, lassen sich nur in der mittelfristigen Planung berücksichtigen. Das Fehlen von bestimmten, für die Navigation relevanten Informationen über Eiseigenschaften, wie Porosität oder Schneedicke, hat zur Folge, dass eine verlässliche Einschätzung der Befahrbarkeit einer Region grundsätzlich nicht oder nur eingeschränkt möglich ist. Durch die kombinierte Nutzung und den Verschnitt verschiedener Datenprodukte, kann den Beschränkungen bestimmter Produkte entgegengewirkt werden. Der MapViewer an Bord bietet der Schiffsführung daher die Möglichkeit Datensätze zu kombinieren und auf Basis einer guten Visualisierung den Entscheidungsfindungsprozess optimal zu unterstützen. Die Performance des Visualisierungssystem ist allerdings abhängig von der Kommunikationsanbindung des Schiffes. Eine limitierte Verfügbarkeit der Iridium Anbindung, führt zu hohen Verzögerungen und somit eingeschränkter

Anwendbarkeit von Produkten, deren Anwendbarkeit maßgeblich von einer echtzeitnahen Verfügbarkeit abhängt.

Referenzen

- Airbus: TerraSAR-X Image Product Guide Basic and Enhanced Radar Satellite Imagery, Airbus Defence and Space, 2.0 edn., 2014.
- Albert, H. P., Dobinsky, H., Hoffmann, K., Linke, B., Nitzschmann, U., Boie, C., Lederer, K., Pruin, B., Krappinger, O., and Schwarz, J.: FS Polarstern Polarforschungs- und Versorgungsschiff, Hansa, 1983.
- AWI: URL <https://spaces.awi.de/confluence/display/PSdevices/Terascan+Satellitenanlage>, 2012.
- AWI: URL <http://www.meereisportal.de/meereismodellierung/modellierung/meereismodelle/prinzipielle-funktionsweise-eines-meereismodells/>, 2016a.
- AWI: URL <https://www.awi.de/expedition/schiffe/polarstern/artikel/wahrzeichen-der-deutschen-polarforschung.html>, 2016b.
- AWI: URL https://epic.awi.de/41994/1/PS101_WR.pdf, 2016c.
- BSH: URL http://www.bsh.de/en/Marine_data/Observations/Ice/1882.jsp, 2016.
- ClarkUniversity: URL <http://www.clarku.edu/sites/default/files/news/files/2012/06/ice-ponds.jpg>, 2017.
- Dierking, W.: Sea ice monitoring by synthetic aperture radar, *Oceanography*, 26(2), 100–111, 2013.
- Ding, Q., Schweiger, A., L’Heureux, M., Battisti, D. S., Po-Chedley, S., Nathaniel C. Johnson, E. B.-W., Harnos, K., Zhang, Q., Eastman, R., and Steig, E. J.: Influence of high-latitude atmospheric circulation changes on summertime Arctic sea ice, *Nature Climate Change*, 7, 289–295, doi: 10.1038/nclimate3241, 2017.
- EARTHDATA: URL <https://earthdata.nasa.gov/user-resources/sensing-our-planet/signs-of-snow>, 2017.
- Eastman, R. and Warren, S. G.: Arctic Cloud Changes from Surface and Satellite Observations, *Journal of Climate*, 23, 4233–4242, doi: 10.1175/2010JCLI3544.1, 2010.
- EUMETSAT: URL <http://www.eumetsat.int/website/home/Satellites/CurrentSatellites/Metop/MetopDesign/index.html>, 2016.
- House, Lloyd, Toomey, and Dickins: The Ice Navigation Manual, Witherby Seamanship International Ltd, 2010.
- Humboldt-State-University: URL http://gsp.humboldt.edu/OLM/Courses/GSP_216_Online/lesson7-2/interpreting-radar.html, 2014.

- Ivanova, N., Johannessen, O. M., Pedersen, L. T., and Tonboe, R. T.: Retrieval of Arctic Sea Ice Parameters by Satellite Passive Microwave Sensors: A Comparison of Eleven Sea Ice Concentration Algorithms, *IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING*, VOL. 52, 7233–7246, 2014.
- Johnston, M. and Timco, G.: Understanding and Identifying Old Ice in Summer, Canadian Hydraulics Centre and National Research Council Canada, 2008.
- Kaleschke, L.: Fernerkundung des Meereises mit passiven und aktiven Mikrowellensensoren, Ph.D. thesis, Universität Bremen, 2003.
- Kruppen, T., Gerdes, R., Haas, C., Hendricks, S., Herber, A., Selyuzhenok, V., Smedsrud, L., and Spreen, G.: Recent summer sea ice thickness surveys in Fram Strait and associated ice volume fluxes, *The Cryosphere*, 10, 523–534, doi: 10.5194/tc-10-523-2016, 2016.
- Lavergne, T.: Low Resolution Sea Ice Drift Product User’s Manual OSI-405-b, OSI SAF, 1.7 edn., 2015a.
- Lavergne, T.: Algorithm Theoretical Basis Document for the OSI SAF Low Resolution Sea Ice Drift Product, Tech. rep., OSI SAF, 2015b.
- Massom, R. A. and Stammerjohn, S. E.: Antarctic sea ice change and variability – Physical and ecological implications, *Polar Science*, 4, 149–186, doi: 10.1016/j.polar.2010.05.001, URL <https://doi.org/10.1016/j.polar.2010.05.001>, 2010.
- Melsom, A., Simonsen, M., Bertino, L., Hackett, B., Waagbø, G. A., and Raj, R.: QUALITY INFORMATION DOCUMENT For Arctic Ocean Physical Analysis and Forecast Product, 2016.
- NOAA: URL <http://noaasis.noaa.gov/NOAASIS/ml/avhrr.html>, 2013.
- NOAA: URL <http://www.ecofoci.noaa.gov/file/pancake-ice-bering-sea-noaa-ship-oscar-dyson02jpg>, 2017.
- NSIDC: URL <https://nsidc.org/arcticseaicenews/>, 2017a.
- NSIDC: URL http://nsidc.org/sites/nsidc.org/files/icelights/files/2014/01/pressure_ridges_duke_large.jpg, 2017b.
- Pease, C. H.: The size of wind-driven coastal polynyas, *Journal of Geophysical Research*, 92(C7), 7049–7059, 1987.
- Przybylak, R.: *The climate of the Arctic*, Springer, 2. edn., 2016.
- Serreze, M. C. and Barry, R. G.: Processes and impacts of Arctic amplification: a research synthesis, *Glob. Planet. Change*, 77, 85–96, 2011.
- Simonsen, M., Hackett, B., Bertino, L., Rød, L. P., Waagbø, G. A., and Drivdal, M.: Product User Manual For Arctic Ocean Physical and Bio Analysis and Forecasting Products, EU Copernicus Marine Service, 5.3 edn., 2016.
- Spreen, G.: Meereisfernerkundung mit dem satellitengestützten Mikrowellenradiometer AMSR(-E) - Bestimmung der Eiskonzentration und Eiskante unter Verwendung der 89 GHz-Kanäle, 2004.

SUHET: Sentinel -1 User Handbook, European Space Agency, 1 edn., 2013.

Sumata, H., Lavergne, T., Girard-Ardhuin, F., Kimura, N., Tschudi, M. A., Kauker, F., Karcher, M., and Gerdes, R.: An intercomparison of Arctic ice drift products to deduce uncertainty estimates, *J. Geophys. Res. Oceans*, 119, 4887–4921, doi: 10.1002/2013JC009724, 2014.

Swart, N. C., Fyfe, J. C., Hawkins, E., Kay, J. E., and Jahn, A.: Influence of internal variability on Arctic sea-ice trends, *Nat. Clim. Change*, 5, 86–89, 2015.

uOttawa: URL <http://www.geomatics.uottawa.ca/copland/AylesIceShelfOffshore30May2006Vincent3.jpg>, 2017.

USGS: URL <https://www.usgs.gov/media/images/young-ice>, 2017.

Yuan, N., Ding, M., Ludescher, J., and Bunde, A.: Increase of the Antarctic Sea Ice Extent is highly significant only in the Ross Sea, *Scientific Reports*, 7, doi: 10.1038/srep41096, 2017.

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich an Eides Statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und nur mit Hilfe der angegeben Referenzen und Hilfsmittel angefertigt habe. Die eingereichte Version stimmt mit der auf dem Speichermedium überein. Weiter bestätige ich, dass ich diese Arbeit noch nicht für einen Abschluss an anderer Stelle eingereicht habe.

Bremen, 28. Mai, 2017

Sebastian Clemens Schulte-Kortnack