

MEEREISDRIFT-KOMPENSATION ZUR MULTITEMPORALEN KLASSIFIZIERUNG VON MEEREIS AUS SATELLITENBASIERTEN SAR- AUFNAHMEN

A. Frost, DLR, Am Fallturm 9, 28359 Bremen, Deutschland
D. Murashkin, Universität Bremen, Bibliothekstraße 1, 28359 Bremen, Deutschland
M. Wiercioch, DLR, Am Fallturm 9, 28359 Bremen, Deutschland
B. Tings, DLR, Am Fallturm 9, 28359 Bremen, Deutschland
S. Jacobsen, DLR, Am Fallturm 9, 28359 Bremen, Deutschland

Zusammenfassung

Meereis ist ständigen Veränderungen unterworfen. Stürme können innerhalb weniger Stunden große Eismassen zusammenschieben und offene Wasserbereiche schließen. Steht das Eis entsprechend unter Druck, schieben sich Schollen über- und untereinander. So entstandenes Packeis ist selbst für Eisbrecher schwer zu durchqueren. Synthetic Aperture Radar Satelliten wie TerraSAR-X liefern unabhängig von der Bewölkung großflächige Aufnahmen des Meereises und damit wertvolle Informationen für die Navigation von Schiffen in polaren Gewässern. In der hier vorliegenden Arbeit wird eine Methode zur automatischen Bestimmung hochaufgelöster Meereisdriftfelder aus TerraSAR-X Aufnahmereihen vorgestellt. Signifikante Strukturen im Meereis werden dabei mittels Phasenkorrelation über mehrere Aufnahmen hinweg erkannt und verfolgt. In den generierten Driftfeldern lassen sich Konvergenz- und Divergenzzonen identifizieren. Die erzeugten Driftvektoren bilden darüber hinaus die Grundlage für eine neuartige, multitemporale Analyse des Meereises hinsichtlich der Eisklasse.

Keywords

Raumfahrt; Fernerkundung; Meereisklassifizierung; Meereisdrift; Neuronale Netze

1. EINLEITUNG

Die Navigation von Schiffen in eisbedeckten Gewässern ist eine Herausforderung für Mensch und Technik und mit erheblichen Risiken verbunden. Extreme Winde, Seegang und Meeresströmungen interagieren mit dem Meereis. Konvergierende Kräfte können innerhalb von wenigen Stunden große Eismassen zusammenschieben und Bereiche offenen Wassers schließen. Mehr noch: Steht das Eis entsprechend unter Druck, schieben sich Eisschollen über- und untereinander. So gebildetes Packeis ist selbst für Eisbrecher teils unpassierbar. Andernorts können divergierende Kräfte geschlossene Eisdecken aufbrechen und natürliche Fahrrinnen entstehen lassen. Für die Navigation polar operierender Schiffe sind zeitnahe Informationen über die lokale Bewegung des Eises und die Verteilung verschiedener Eisklassen (z.B.: Neueis, einjähriges Eis, Packeis etc.) sehr wertvoll.

Synthetic Aperture Radar (SAR) Satelliten wie beispielsweise TerraSAR-X erfassen unterschiedliche Strukturen im Meereis - dank ihrer aktiven Radarantenne unabhängig von Wetterbedingungen, Wolkenbedeckung und Tageslicht. TerraSAR-X befindet sich in einer nahezu polaren Umlaufbahn in 514 km Höhe und umrundet die Erde ca. 15 Mal am Tag. SAR-Aufnahmen mit verschiedenen räumlichen Auflösungen und Abdeckungen werden operationell und in Nahe-Echtzeit bereitgestellt [1]. Eine kurze Auflistung ausgewählter Bildprodukte findet sich in TAB 1, ausführlichere Spezifikationen in [2]. BILD 1 zeigt beispielhaft den Ausschnitt einer TerraSAR-X ScanSAR Aufnahme über arktischem Meereis.

In der hier vorliegenden Arbeit wird ein Verfahren zur automatischen Bestimmung hochaufgelöster Meereisdriftfelder aus TerraSAR-X Aufnahmereihen vorgestellt (Kapitel 2). Signifikante Strukturen im Meereis werden dabei mittels Phasenkorrelation über mehrere Aufnahmen hinweg erkannt und verfolgt. Die Genauigkeit der erzeugten Meereisdriftfelder liegt bei 20 m (1-sigma error). In den generierten Meereisdriftfeldern werden Konvergenzzonen, Divergenzzonen und Scherungszonen sichtbar [3]. Die Driftfelder (bzw. Driftvektoren) bilden darüber hinaus die Grundlage für eine neuartige, multitemporale Analyse des Meereises. Hierfür wird der Algorithmus zur Meereisdriftbestimmung mit einem bestehenden Algorithmus zur Klassifizierung des Meereises kombiniert.

Der Algorithmus zur Klassifizierung des Meereises wertet texturbasierte und polarimetrische Merkmale [4-5] aus, welche aus den Radarrückstreukoeffizienten einer SAR-Aufnahme berechnet werden. Die Merkmale werden in eine Künstliche Intelligenz (KI) eingespeist, welche die Klassifizierung ausführt. Verschiedene Eisklassen besitzen unterschiedliche Radarrückstreueigenschaften und lassen sich daher voneinander abgrenzen. Einige Eisklassen zeigen aber auch gleichartiges Rückstreuverhalten, wodurch der automatischen Klassifizierung Grenzen gesetzt sind. Die hier vorgestellte Idee ist, Messdaten mehrerer, zeitlich aufeinanderfolgender SAR-Aufnahmen heranzuziehen, um das Meereis hinsichtlich Eisentwicklung und -zustand zu analysieren. Wir erhoffen uns dadurch in Zukunft aussagekräftigere Klassifizierungsergebnisse.

Der Schwerpunkt der hier vorliegenden Arbeit liegt zunächst in der Analyse der zeitlichen Konsistenz von Klassifizierungsergebnissen sequentieller SAR-Aufnahmen.

Änderungen der Eisklasse von einer Aufnahme zur nächsten (unter Berücksichtigung der Drift) werden erfasst und an beispielhaft ausgewählten Aufnahmen des Arktischen Ozeans diskutiert (Kapitel 3).

Modus	Abdeckung	Auflösung
Wide ScanSAR	270 km × 200 km	40,0 m (45°) – 40,0 m (20°)
ScanSAR	100 km × 150 km	18,5 m (45°) – 19,2 m (20°)
Stripmap, single polarized	30 km × 50 km	3,3 m (45°) – 3,5 m (20°)
Stripmap, dual polarized	15 km × 50 km	6,6 m (45°) – 6,6 m (20°)

TAB 1. Abdeckung und Auflösung (in Azimut) ausgewählter TerraSAR-X Bildprodukte. In den Klammern angegebene Gradzahlen bezeichnen Einfallswinkel.

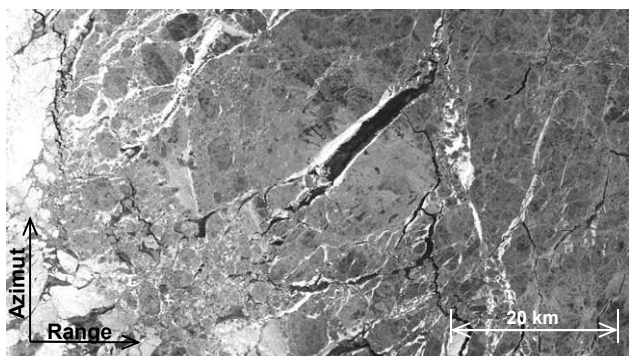


BILD 1. Ausschnitt einer TerraSAR-X Aufnahme der gefrorenen Barentssee. Unterschiedliche Strukturen im Meereis werden sichtbar. Offenes Wasser erscheint in der Aufnahme aufgrund der vergleichsweise geringen Radar-rückstreuung schwarz.

2. BESTIMMUNG DER MEEREISDRIFT

2.1. Grundprinzip

Zur Bestimmung der Meereisdrift aus zwei zeitlich aufeinanderfolgenden SAR-Aufnahmen bedienen wir uns der sogenannten Phasenkorrelation [6]. Die Phasenkorrelation ist ein aus verschiedensten Anwendungsbereichen der Bildverarbeitung bekanntes Verfahren zur Erfassung der Translation von Bildern (oder Bildausschnitten). Sie findet u.a. Einsatz in der medizinischen Bildverarbeitung, zur 3D-Rekonstruktion, und zur Kamerastabilisierung [7-9]. Im Vergleich zu anderen Verfahren bietet die Phasenkorrelation den Vorteil, vergleichsweise unempfindlich gegenüber Rauschen sowie globalen Helligkeitsschwankungen zu sein. Dies eröffnet für die Drift-Bestimmung aus sequentiellen SAR-Aufnahmen die Möglichkeit, verschiedene Aufnahmemoden, Einfallswinkelbereiche, Bänder, oder gar Missionen zu kombinieren. In unserer vorangegangenen Arbeit [10] zeigten wir Meereis-Driftfelder generiert aus Paaren von TerraSAR-X und RadarSAT-2 Aufnahmen.

BILD 2 veranschaulicht den für diese Arbeit implementierten Programmablauf. Zunächst erfolgt eine Co-Registrierung auf Basis der geographischen Koordinaten

jedes Pixels. D.h. die Pixelraster der beiden Aufnahmen werden aneinander angeglichen.

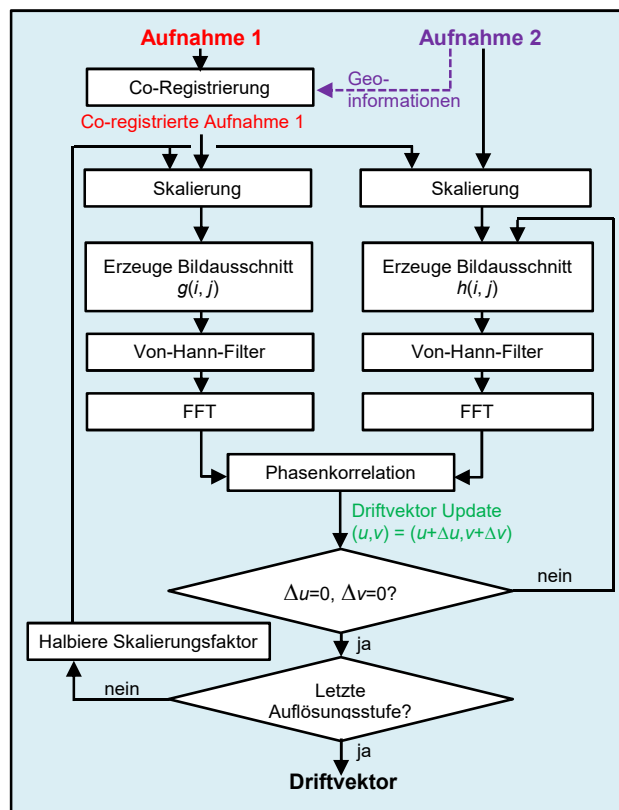


BILD 2. Programmablauf zur Bestimmung eines Driftvektors

Nach der Co-Registrierung wird für jeden zu bestimmenden Driftvektor (u, v) aus jeder SAR-Aufnahme ein quadratischer Bildausschnitt betrachtet:

- (1) $g(i, j) = \text{Aufnahme1}(x + i, y + j)$
mit $i=1 \dots N, j=1 \dots N$
- (2) $h(i, j) = \text{Aufnahme2}(x + u + i, y + v + j)$
mit $i=1 \dots N, j=1 \dots N$

wobei u und v zunächst mit Null initialisiert werden.

Den Kern der Driftvektorbestimmung bildet eine schnelle Fourier-Transformation (FFT), welche auf beide Bildausschnitte angewendet wird. Um Sprünge in der FFT zu vermeiden, erfolgt eine Filterung beider Bildausschnitte mit der Von-Hann-Fensterfunktion [11].

Aus den fouriertransformierten Bildausschnitten wird das Kreuzleistungsdichtespektrum bestimmt und in den Ortsraum zurücktransformiert:

$$(3) \quad PC(i, j) = \mathfrak{F}^{-1} \left(\frac{\mathfrak{F}(g) \cdot \mathfrak{F}^*(h)}{|\mathfrak{F}(g) \cdot \mathfrak{F}^*(h)|} \right)$$

$PC(i, j)$ ist wiederum ein quadratisches Bild, welches die Translation zwischen den beiden Bildausschnitten g und h durch einen Peak anzeigt. Die Extraktion dieses Peaks liefert direkt den Driftvektor.

Im Unterschied zu den aus der Literatur bekannten Anwendungen der Phasenkorrelationsmethode haben wir ein iteratives Vorgehen eingeführt. D.h. die beschriebene Driftvektorschätzung wird wiederholt, wobei der Bildausschnitt h in Gleichung (2) entsprechend dem ermittelten

Driftvektor neu ausgeschnitten wird, bis mit $\Delta u=0$ und $\Delta v=0$ keine Änderung mehr verzeichnet wird und der finale Driftvektor gefunden ist.

Um eine komplette SAR-Aufnahme abzudecken wird die Position der Bildausschnitte (x, y) entsprechend der gewünschten Auflösung des Driftvektorfeldes verschoben und der oben beschriebene Ablauf für jeden Vektor ausgeführt.

2.2. Auflösungspyramide

Die Wahl der Größe N ist nicht trivial. Zu große Bildausschnitte decken mitunter Meereisbereiche mit unterschiedlicher Drift ab, was bei der Driftvektorschätzung zu mehrdeutigen Ergebnissen führt. Werden die Bildausschnitte zu klein gewählt, erfassen sie nicht mehr große Verschiebungen des Meereises. Eine bewährte Herangehensweise, um dieses Problem zu lösen, ist die Ausführung der Phasenkorrelation in einer Auflösungspyramide. Begonnen wird mit flächenmäßig großen Bildausschnitten, um große Verschiebungen zu erfassen. Schritt für Schritt werden die Bildausschnitte verkleinert.

Um den Rechenaufwand gering zu halten, wird mit herunterskalierten SAR-Aufnahmen gearbeitet. Erst die letzte Auflösungsstufe besitzt die Originalauflösung der SAR-Aufnahmen. Die Auflösungsstufen davor sind jeweils um Faktor 2 reduziert. BILD 3 veranschaulicht das Verfahren.

2.3. Idee der multitemporalen Meereis-Klassifizierung mittels Drift-Kompensation

Die Driftvektoren eröffnen die Möglichkeit, Meereis in seiner zeitlichen Entwicklung zu analysieren. Dieselbe Eisscholle beispielsweise kann über mehrere SAR-Aufnahmen hinweg verfolgt und der Zustand des Eises in seiner zeitlichen Entwicklung beobachtet werden.

Andererseits können Driftvektorfelder dabei helfen, die Klassifizierung an sich zu verbessern, wenn – statt die Klassifizierung mit jeweils nur einer SAR-Aufnahme durchzuführen – auf alle zur Verfügung stehenden Messdaten zurückgegriffen werden kann [12]. Hierfür wird angenommen, dass sich die Eisklasse nur selten ändert.

3. EXPERIMENTELLE ERGEBNISSE

Wie eingangs erwähnt findet eine KI Anwendung, welche das abgebildete Meereis einer einzelnen SAR-Aufnahme klassifiziert. Vier Eisklassen werden unterschieden: Eisfreies Wasser (K1), Neues Eis (K2), glattes Eis (K3) und raues/deformiertes Eis (K4). Je nach Aufnahmemodus ist das Ergebnis mit mehr oder weniger starkem Rauschen behaftet und unterliegt einem variablen Klassifizierungsfehler.

Die Driftkompensation erlaubt es erstmals, die Klassifizierung in ihrer zeitlichen Konsistenz zu analysieren.

Der hierzu durchgeführte Test umfasst 11 TerraSAR-X Aufnahmen über dem arktischen Ozean mit vornehmlich mehrjährigem/rauem Eis (K4). BILD 5 zeigt beispielhaft die erste Aufnahme dieser Zeitreihe, BILD 6 die zweite. Die zeitliche Differenz zwischen den Aufnahmen beträgt ca. 24 Stunden. Die Aufnahmen wurden zueinander coregistriert und die Meereisdrift berechnet. Die in BILD 6 eingeblendeten Pfeile repräsentieren Driftvektoren. Es lässt sich festhalten, dass die Drift in diesem Aufnahme-paar in ihrer Richtung sehr homogen ist. Das Meereis

bewegte sich in westlicher Richtung mit durchschnittlich 5 m/h. Eine Konvergenzzone ist im unteren Bildabschnitt sichtbar. Die Driftgeschwindigkeit verlangsamt sich hier von ca. 16 m/h (magenta) auf 4 m/h (cyan). Infolge der Konvergenz verkleinert sich ein Spalt glatten (vermutlich jüngeren) Eises (siehe BILD 7). Weiter rechts am Bildrand taucht eine weitere Konvergenzzone auf. Hier reduziert sich die Driftgeschwindigkeit von 4 m/h (cyan) auf ca. 3 m/h (grün).

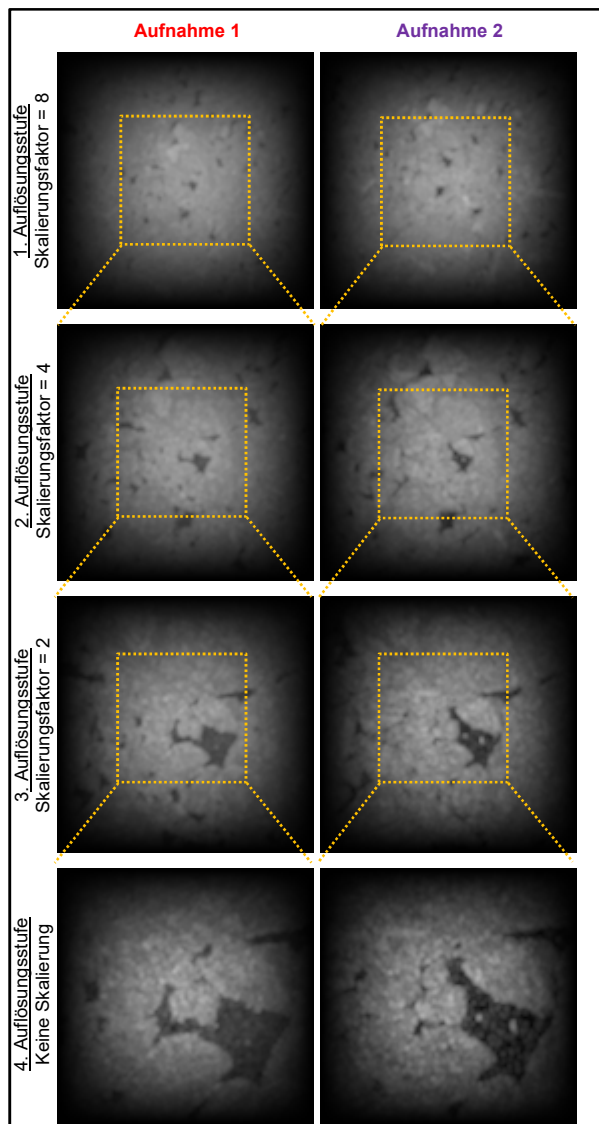


BILD 3. Driftvektorschätzung in einer Auflösungspyramide. Dargestellt sind jeweils die Bildausschnitte nach Von-Hann-Filterung. Sie zeigen Meereis mit kleineren Bereichen offenen Wassers, und darin wiederum kleinere Eisschollen, die eine individuelle Bewegung aufweisen.

Beide Aufnahmen wurden getrennt voneinander klassifiziert und anschließend das Klassifizierungsergebnis der Aufnahme 1 driftkompensiert. Dadurch ist ein direkter, pixelweiser Vergleich möglich.

In BILD 8 ist (entsprechend der Legende in BILD 4) farblich dargestellt, wo sich die Klassifizierung von einer Aufnahme zur nächsten ändert. Es zeigt sich in allen unter-

suchten Aufnahmepaaren, dass Änderungen der Eisklasse vergleichsweise selten auftreten. Insbesondere in Bereichen homogener Driftverhältnisse sind sie eher auf Randeffekte und Rauschen zurückzuführen. In Konvergenzonen tauchen viele Umklassifizierungen auf. Zum Teil ist dies erwartungsgemäß, etwa wenn sich die Eisklasse von „glattes Eis“ zu „raues/deformiertes Eis“ ändert. Es werden allerdings auch unrealistische Umklassifizierungen in der Konvergenzzone verzeichnet, von „raues/deformiertes Eis“ zu „glattes Eis“ oder von „raues/deformiertes Eis“ zu „Neueis“). Die Ursachen für die unrealistischen Änderungen der Eisklasse zu ergründen und – damit einhergehend – die Klassifizierung an sich zu verbessern ist Gegenstand aktueller Forschungsarbeiten.

		Aufnahme1			
		K1	K2	K3	K4
Aufnahme2	K1				
	K2				
	K3				
	K4				

BILD 4. Farbkodierung der Umklassifizierungen. K1: Eisfreies Wasser, K2: Neueis, K3: Glattes Eis, K4: Raues/deformiertes Eis

4. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Driftvektorfelder, generiert aus hochauflösenden, sequentiellen SAR-Aufnahmen, geben Einblick in lokale Bewegungen des Meereises. Für die Navigation polar operierender Schiffe können sie von erheblichem Nutzen sein, da sie aufzeigen, wo sich eine offene Fahrwinne weiter öffnet oder schließt, und wo das Meereis das Potential besitzt, Presseisrücken auszubilden. Neben der Meereisdrift sind aber auch weitere Meereisparameter von großem Interesse, klassischerweise Parameter wie die Eiskonzentration, -dicke und Verteilung verschiedener Eisklassen.

In dieser Arbeit wurde eine neue Methode erprobt, die es ermöglicht, Umklassifizierungen von Meereis aus SAR-Zeitreihen zu detektieren. Für die Klassifizierung der einzelnen SAR-Aufnahmen fand ein KI-basierter Algorithmus Anwendung.

Erste Tests mit TerraSAR-X Zeitreihen zeigen, dass Umklassifizierungen vergleichsweise selten auftreten. Insbesondere in Bereichen homogener Drift sind sie eher auf Randeffekte und Rauschen zurückzuführen. In Bereichen inhomogener Drift, sprich Konvergenzonen, tauchen Umklassifizierungen vermehrt auf. Sowohl für Konvergenzonen realistische Umklassifizierungen (etwa von der Eisklasse „glattes Eis“ zu „deformiertes Eis“) als auch unrealistische Umklassifizierungen (von „deformiertes Eis“ zu „glattes Eis“ oder „Neueis“) werden detektiert. Gegenstand aktueller Forschungsaktivitäten ist die Analyse der Ursachen für Umklassifizierungen. In weiteren Arbeitsschritten soll eine Klassifizierung auf Basis mehrerer, zeitlich aufeinander folgender SAR-Aufnahmen entwickelt werden. Die Idee ist, alle zur Verfügung stehenden Messdaten zu verwenden. Den Schlüssel dazu bildet die hier

vorgestellte Driftkompensation. Wir erhoffen uns dadurch in Zukunft aussagekräftigere Klassifizierungsergebnisse.

Unabhängig von der Beurteilung, ob eine Umklassifizierung realistisch ist oder nicht, lässt sich an dieser Stelle bereits festhalten: Die Visualisierung von Bereichen, in denen Umklassifizierungen – welcher Art auch immer – vorstangehen, zeigen Bereich im Meereis auf, in denen relevante Veränderungen vorstangehen.

REFERENZEN

- [1] Stefan Buckreuss, Birgit Schättler, Thomas Fritz, Josef Mittermayer, Ralph Kahle, Edith Maurer, Johannes Böer, Markus Bachmann, Falk Mrowka, Egbert Schwarz, Helko Breit & Ulrich Steinbrecher (2018). Ten years of TerraSAR-X operations. *Remote Sensing*, 10(6), 873.
- [2] Eineder, M., Fritz, T., Mittermayer, J., Roth, A., Boerner, E., & Breit, H. (2008). TerraSAR-X ground segment, basic product specification document (No. TX-GS-DD-3302). CLUSTER APPLIED REMOTE SENSING (CAF) Oberpfaffenhofen (GERMANY).
- [3] Frost, A., Wiercioch, M., Velloso, D., Singha, S., & Wiehle, S. (2019, January). Observing convergent and divergent sea ice motion fields using spaceborne SAR image time series: Validation of a drift retrieval algorithm with buoy data. In *Geophysical Research Abstracts* (Vol. 21).
- [4] Lehner, S., Krumpen, T., Frost, A., Ressel, R., Busche, T. E., & Schwarz, E. (2014, July). First tests on near real time ice type classification in Antarctica. In *2014 IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium* (pp. 4876-4879). IEEE.
- [5] Ressel, Rudolf, Anja Frost, and Susanne Lehner. "Comparing automated sea ice classification on single-pol and dual-pol terrasarsar-x data." *2015 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*. IEEE, 2015.
- [6] Bracewell, R. N. *The Fourier transform and its applications*. Vol. 31999. New York: McGraw-Hill, 1986.
- [7] Kolar, R., V. Harabis, and J. Odstrcilik. "Hybrid retinal image registration using phase correlation." *The Imaging Science Journal* 61.4 (2013): 369-384.
- [8] Slamani, M. A., Krol, A., Beaumont, J., Price, R. L., Coman, I. L., & Lipson, E. D. (2006). Application of phase correlation to the montage synthesis and three-dimensional reconstruction of large tissue volumes from confocal laser scanning microscopy. *Microscopy and Microanalysis*, 12(2), 106.
- [9] Erturk, S. A. R. P. "Digital image stabilization with sub-image phase correlation based global motion estimation." *IEEE transactions on consumer electronics* 49.4 (2003): 1320-1325.
- [10] Frost, A., Wiehle, S., Singha, S., & Krause, D. (2018, July). Sea Ice Motion Tracking from Near Real Time Sar Data Acquired During Antarctic Circumnavigation Expedition. In *IGARSS 2018-2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium* (pp. 2338-2341). IEEE.
- [11] Blackman, Ralph Beebe, and John Wilder Tukey. "Particular pairs of windows." *The measurement of power spectra, from the point of view of communications engineering* (1959): 98-99.
- [12] Dierking, Wolfgang. "Sea ice monitoring by synthetic aperture radar." *Oceanography* 26.2 (2013): 100-111.

Kontaktadresse:
 anja.frost@dlr.de

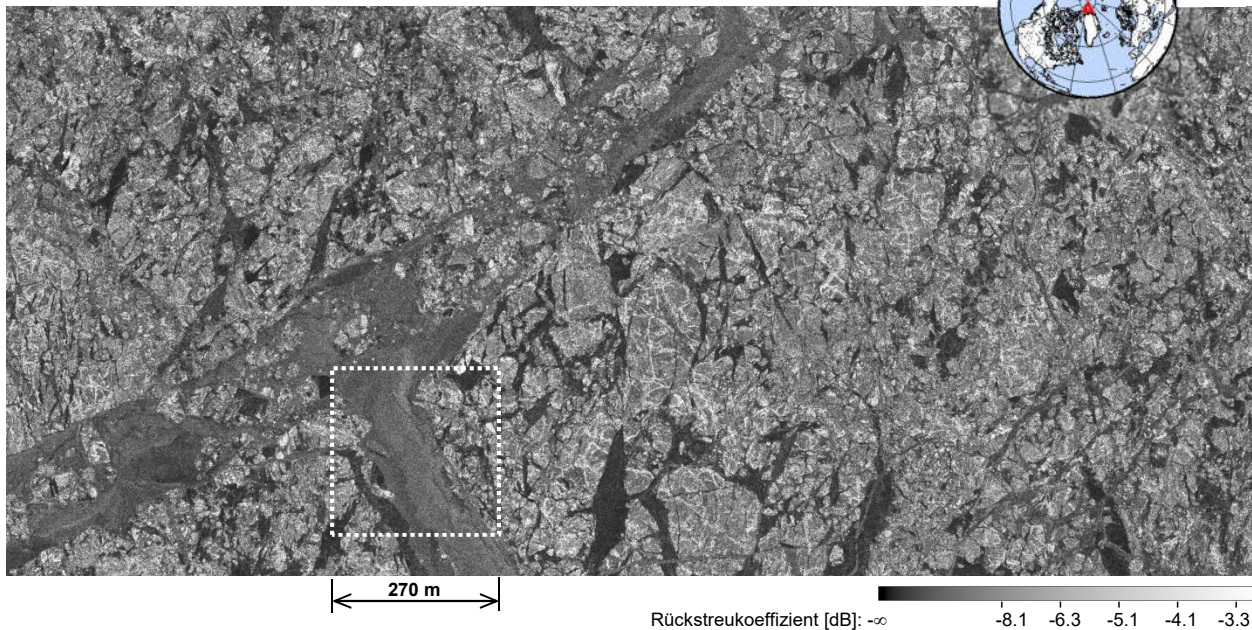
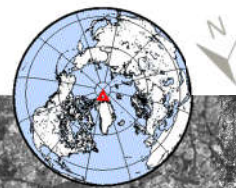


BILD 5. Ausschnitt einer TerraSAR-X Aufnahme vom 05.03.2018 über arktischem Meereis, kalibriert und co-registriert auf die in BILD 6 gezeigte Aufnahme des Folgetages. Eine Vergrößerung des durch das weiß gestrichelte Kästchen markierten Bereiches ist in BILD 6 zu sehen.

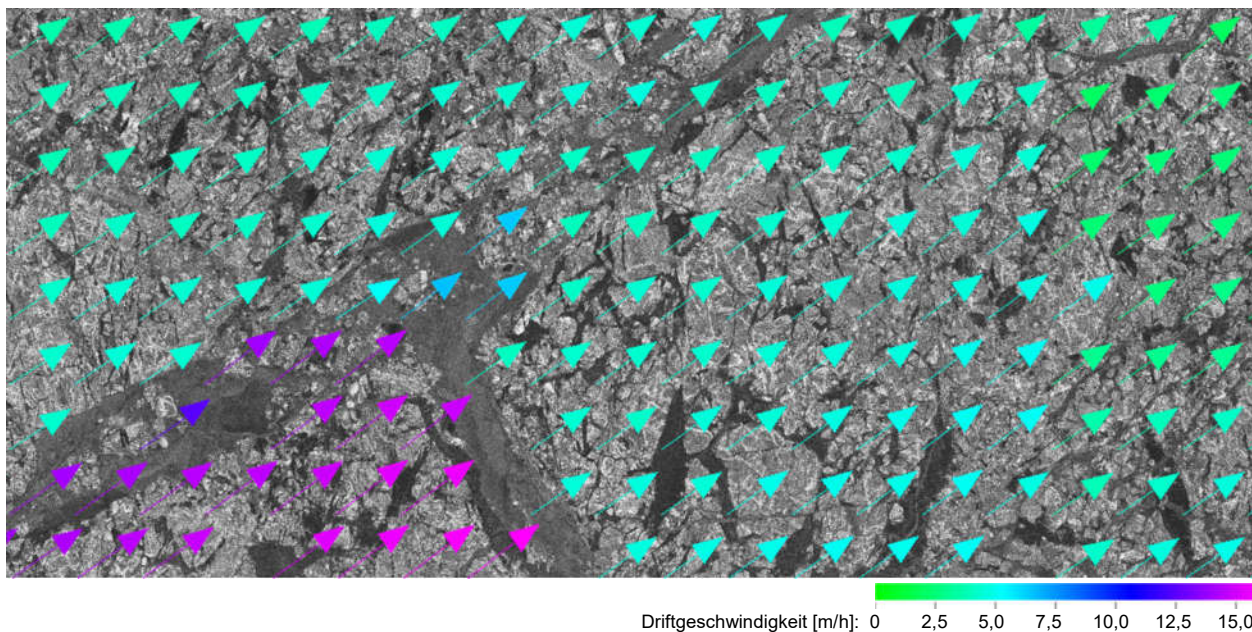


BILD 6. Ausschnitt einer TerraSAR-X Aufnahme vom 06.03.2018 über arktischem Meereis. Die überlagerten Pfeile repräsentieren die ermittelte Drift zwischen der Aufnahme aus BILD 5 und der hier dargestellten Aufnahme.

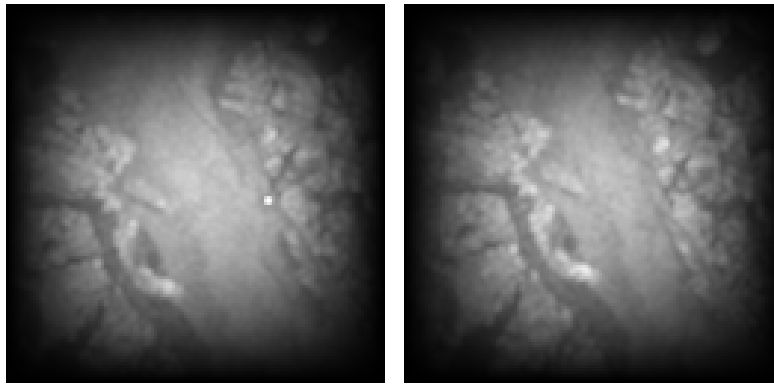


BILD 7. Vergrößerung des in BILD 5 weiß umrandeten Bildbereichs in der Konvergenzzone. Links: Ausschnitt aus Aufnahme 1 (05.03.2018). Rechts: Co-registrierter, driftkompensierter Ausschnitt aus Aufnahme 2 (06.03.2018).

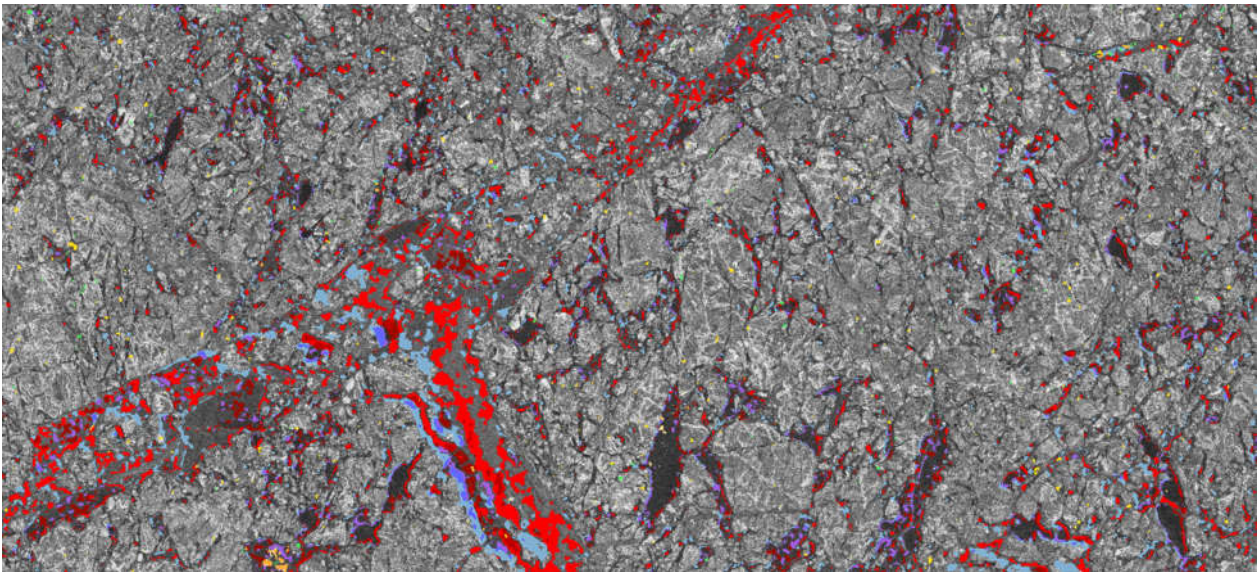


BILD 8. Farbliche Kennzeichnung von Bildpunkten, welche in Aufnahme 2 (BILD 6) eine andere Eisklasse zugewiesen bekommen haben als in Aufnahme 1 (BILD 5). Änderungen der Eisklasse tauchen in Bereichen homogener Drift gelegentlich auf und sind im Wesentlichen auf Rauschen und Randeffekte zurückzuführen. In Konvergenzonen sind Änderungen der Eisklasse dominanter.