

# Verbundprojekt: WTZ RUS: IRO – Eis-Routen-Optimierung – Eine Voraussetzung für einen wirtschaftlichem Transport auf dem Nördlichen Seeweg; Vorhaben: Schneeauflage auf Meereis

Christian Melsheimer, Georg Heygster

Abschlussbericht, Januar–August 2011

Der vorliegende Bericht fasst die Ergebnisse der acht Monate des Projektes *IRO – Eis-Routen-Optimierung – Eine Voraussetzung für einen wirtschaftlichen Transport auf dem Nördlichen Seeweg; Vorhaben: Schneeauflage auf Meereis* zusammen. Das Projekt wurde nach dem Kick-Off Meeting BMWi-seitig beendet, nachdem die russische Seite nicht die erwarteten Beiträge liefern konnte.

Dieser Bericht dient der Sicherung der bis zum Abbruch erzielten umfangreichen Ergebnisse zur Analyse des wissenschaftlichen Standes, der Analyse und Synergie von Daten verschiedener Sensoren (hier: passive und aktive Mikrowellensensoren). Darüber hinaus wird der Bericht hilfreich sein in der Startphase des nunmehr begonnenen Projektes IRO-2.

## **1 Schneeauflage auf Meereis**

Eine Schneeauflage auf Meereis reduziert den Wärmefluss zwischen Ozean und Atmosphäre, und beeinflusst damit Eisdickenwachstum und Abschmelzen. Außerdem erhöht der Schnee auf dem Eis bei Eisfahrt die Reibung erheblich. Daher ist die Kenntnis der Schneeauflage relevant für Vorhersage von Eisbedingungen und Eisfahrt, und wegen der Unzugänglichkeit und der starken Veränderlichkeit des Meereises sind Fernerkundungsmethoden geboten, um flächenhafte Informationen über die Schneeauflage auf dem Meereis zu erhalten.

## 2 Fernerkundung der Schneeauflage

### 2.1 Algorithmen

Eine Schneeauflage auf dem Meereis beeinflusst die Mikrowellen-Emissivität, und zwar umso stärker, je höher die Frequenz und je dicker die Schneeschicht ist. Daher wird die Differenz von Helligkeitstemperaturen <sup>1</sup> verschiedener Frequenzen durch eine Schneeauflage verändert, was man ausnutzen kann, um Informationen über die Dicke der Schneeschicht zu gewinnen (*Markus & Cavalieri*, 1998).

Man benutzt dabei die Helligkeitstemperaturen bei 19 und 37 GHz, vertikaler Polarisation,  $T_B(19V)$  bzw.  $T_B(37V)$ , wie sie von den Satelliteninstrumenten SSM/I (Special Sensor Microwave/Imager, s. Anhang A.2), oder AMSR-E (Advanced Microwave Scanning Radiometer for EOS, s. Anhang A.1) gemessen werden.

Um andere Effekte (z.B. den Einfluss der Temperatur) auf die Helligkeitstemperatur zu minimieren, wird noch mit der Summe normiert, der entstehende Ausdruck heißt üblicherweise Gradientenverhältnis (“gradient ratio”),  $GR^V$ :

$$GR^V = \frac{T_B(37V) - T_B(19V)}{T_B(37V) + T_B(19V)} \quad (1)$$

Durch Regressionsanalyse von in situ gemessenen Schneedicken und Helligkeitstemperaturen haben *Markus & Cavalieri* (1998) gezeigt, dass unter bestimmten Bedingungen (s. später, S. 3)  $GR^V$  linear von der Dicke der Schneeauflage auf dem Eis abhängt:

$$h_{\text{snow}} [\text{cm}] = a + b GR_{\text{ice}}^V \quad (2)$$

mit zwei Konstanten  $a$  und  $b$ .

Da das Integrationsgebiet der Antenne (ein “Pixel”) einen Durchmesser von mehreren Kilometern hat, misst der Satellitensensor normalerweise eine lineare Mischung aus der Emission von offenem Wasser und Meereis (pro “Pixel”):

$$T_B = CT_{B,\text{ow}} + (1 - C)T_{B,\text{ice}} \quad (3)$$

wobei  $C$  der Meereisbedeckungsgrad ist, also der Anteil von Meereis an der Fläche des “Pixels”).

---

<sup>1</sup>Im Mikrowellenbereich wird die Intensität von emittierter Strahlung, also die Radianz [ $\text{W}/(\text{m}^2\text{sr})$ ], umskaliert und als Helligkeitstemperatur [K] bezeichnet. Es ist die Temperatur, die ein schwarzer Körper haben müsste, um genau die Strahlungsintensität zu emittieren, die gemessen wurde

Wenn man feste Durchschnittswerte für die Helligkeitstemperaturen von offenem Wasser,  $T_{B,ow}(19V)$  und  $T_{B,ow}(37V)$ , benutzt, kann man aus den vom Satelliten gemessenen Helligkeitstemperaturen das Gradientenverhältnis vom Meereis,  $GR_{ice}^V$ , bestimmen.

Dann ergibt sich für die Schneedicke  $h_{snow}$  aus Gleichung (2):

$$h_{snow} = a + b \times \frac{T_B(37V) - T_B(19V) - K^-(1 - C)}{T_B(37V) + T_B(19V) - K^+(1 - C)} \quad (4)$$

wobei  $C$  der Eisbedeckungsgrad ist und  $K^+$  und  $K^-$  von den erwähnten Durchschnittswerten offenen Wassers abhängen:

$$K^- = T_B(37V) - T_B(19V), \quad K^+ = T_B(37V) + T_B(19V) \quad (5)$$

Die Konstanten  $a$  und  $b$  hängen dabei von dem benutzten Satellitensensor ab, für den hier vorgesehenen AMSR-E ist  $a = -2.9$ ,  $b = -782.4$  (Markus & Cavalieri, 1998), für den Sensor SSM/I ist  $a = -2.34$ ,  $b = -771$  (Markus et al., 2006).

Verschiedene Studien (Markus et al., 2006; Powell et al., 2006) haben gezeigt, dass diese Retrieval-Methode für glattes, erstjähriges Eis gut funktioniert, bis zu einer Schneedicke von etwa 40 cm, jedoch Probleme hat, wenn das Meereis unter dem Schnee rau ist (wie z.B. für mehrjähriges Eis). Entweder muss dafür raues Eis ausmaskiert werden, oder die Konstanten  $a$  und  $b$  aus Gleichung (4) müssten angepasst werden. Auch unter Schmelzbedingungen hat die Methode Probleme, da nasser Schnee ein völlig andere Emissionsverhalten hat als trockener Schnee.

Sowohl Meereis unter Schmelzbedingungen als auch raues Eis streuen die Mikrowellen eines Scatterometers stärker zurück als glattes Eis bei Frost (Voss et al., 2003). Der Schwellwert ist allerdings nicht konstant.

## 2.2 Implementierung

Die Bestimmung der Schneedicke auf dem Meereis vereint drei Komponenten, die zusammen Version 0 des Algorithmus darstellen:

1. Bestimmung der Meereisbedeckung
2. Anwendung des Schneedicken-Retrievals nach Markus & Cavalieri (1998) aus Pixel mit mindestens 80% Eisbedeckung
3. Vergleich mit dem Radarrückstreuquerschnitt aus Scatterometerdaten, um mögliche Gebiete mit Schmelzbedingungen und rauem Eis zu erkennen.

### 2.2.1 Eisbedeckungsgrad

Der Eisbedeckungsgrad (“sea ice concentration”) wird operationell aus den 89-GHz-Kanälen des AMSR-E bestimmt mittels des “ARTIST (Arctic Radiation and Turbulence Interaction Study) Sea Ice (ASI) algorithm” (*Kaleschke et al.*, 2001). Die benötigten Satellitendaten werden täglich von JAXA (Japan Aerospace Exploration Agency) und NSIDC (National Snow and Ice Data Center, U.S.A.) bezogen. Die umfangreiche Software dazu ist überwiegend in IDL (interactive data language) programmiert.

### 2.2.2 Schneeauflage

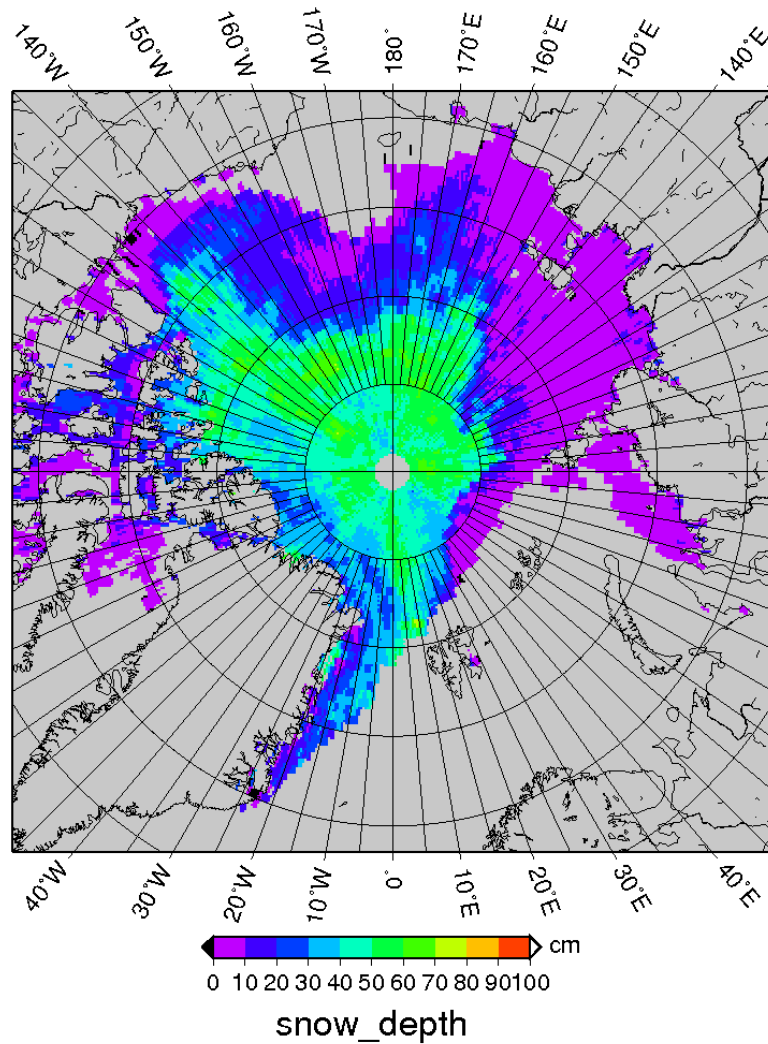
In die Softwareumgebung zur Bestimmung des Eisbedeckungsgrades wurde an mehreren Stellen zusätzliche Komponenten eingefügt, die die benötigten Helligkeitstemperaturen  $T_B(19V)$  bzw.  $T_B(37V)$  abzugreifen und daraus die Schneehöhe nach Gleichung (4) zu bestimmen. Als benötigten Durchschnittswerte für die Helligkeitstemperatur von offenem Wasser (s. Gleichung (5)) wurden diejenigen verwendet, die auch der sogenannte Bootstrap-Algorithmus (Eisbedeckungsgrad aus 19 und 37 GHz) benutzt, und zwar:

$$T_{B,ow}(19V) = 181 \text{ K} \quad T_{B,ow}(37V) = 208 \text{ K} \quad (6)$$

Die resultierenden “rohen” Schneedickendaten werden einzeln für jeden Satellitenüberflug und zusätzlich kombiniert als Tagesmittel abgespeichert und können mit darauf abgestimmten Programmen in verschiedenen Kartenprojektionen dargestellt werden. Ein Beispiel für eine solche Karte der Tagesmittelwerte in polarstereographischer Projektion ist in Abbildung 1 zu sehen.

### 2.2.3 Radar-Rückstreuung

Vom Scatterometer ASCAT (Advanced Scatterometer, s. Anhang A.3) gemessene Radar-Rückstreuquerschnitte werden am Ifremer (Institut français de recherche pour l’exploitation de la mer, Frankreich) im NetCDF-Format archiviert und werden von dort per elektronischem Transfer bezogen. Software zum Lesen und Darstellen dieser Daten wurde erstellt, außerdem eine Schnittstelle zu den aus AMSR-E berechneten Eis- und Schneedaten, um dann gezielt den Rückstreuquerschnitt und die “rohe” Schneedicke zu vergleichen und Gebiete hoher Rückstreuung auszumaskieren. Eine Karte des Rückstreuquerschnitts von ASCAT ist in Abbildung 2 zu sehen, in derselben Kartenprojektion wie Abbildung 1.

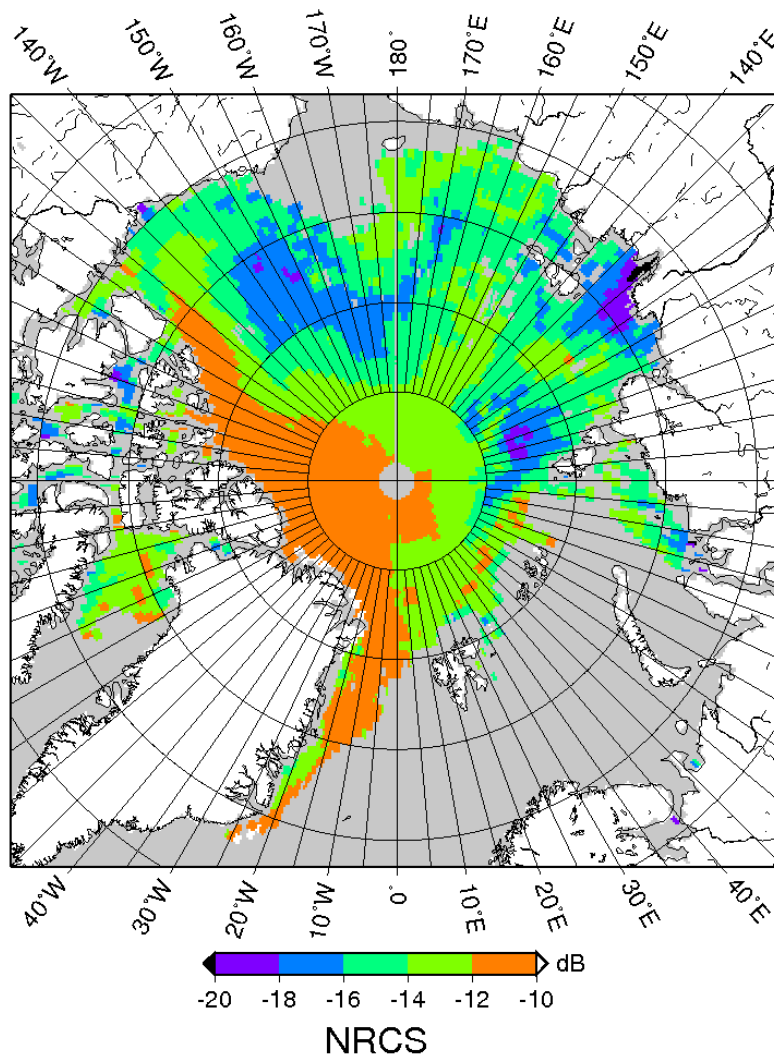


**Abbildung 1:** Tagesmittel der Schneedicke auf Meereis für den 4.11.2009, aus AMSR-E Daten.

## A Satelliteninstrumente

### A.1 AMSR-E

Das Radiometer AMSR-E (Advanced Microwave Scanning Radiometer for EOS) befindet sich auf dem NASA-Satelliten Aqua, der einen quasi-polarer Orbit mit einer Umlaufzeit von etwa 100 Minuten hat. AMSR-E scannt konisch, d.h. die



**Abbildung 2:** Rückstreuquerschnitt (NRCS) in dB, 4.11.2009, gemessen von ASCAT

Scanlinien auf der Erdoberfläche sind Kreisabschnitte. Dies hat den Vorteil, dass die Antennenblickrichtung relativ zum Nadir – und damit der Einfallswinkel auf der Erdoberfläche – entlang einer Scanlinie konstant ist. Die Antennenblickrichtung ist  $47.4^\circ$  von Nadir, auf der Erdoberfläche ist daher der Einfallswinkel (wegen der Erdkrümmung)  $55^\circ$ . Die Strahlung wird in 10 Kanälen gemessen, und zwar in fünf Frequenzen jeweils in vertikaler und horizontaler Polarisation, wie in

Tabelle 1 dargestellt.

**Tabelle 1: AMSR-E-Kanäle**

Freq. [GHz]	6.93	10.65	18.7	23.8	36.5	89.0
Pol.	H,V	H,V	H,V	H,V	H,V	H,V

Die räumliche Auflösung hängt von der Frequenz ab und reicht von  $43 \times 75$  km bei 6.93 GHz bis zu  $3.5 \times 5.9$  km bei 89 GHz. Der Aufnahmestreifen ist mit 1445 km so breit, dass mit den 13 bis 14 Orbits pro Tag die gesamte Arktis abgedeckt wird.

## A.2 SSM/I

Radiometer des Typs SSM/I (Special Sensor Microwave/Imager) befanden sich auf den operationellen Satelliten F-8 bis F-15 des Defense Meteorological Satellite Program der USA (DMSP), von 1987 bis 2010. Die Umlaufzeit, die Aufnahmegeometrie und die Abdeckung sind ähnlich wie bei AMSR-E, auch die Kanäle sind ähnlich, allerdings gibt es nicht die beiden Kanäle mit niedrigerer Frequenz. s. Tabelle 2

**Tabelle 2: SSM/I-Kanäle**

Freq. [GHz]	19.35	22.235	37.0	85.5
Pol.	H,V	V	H,V	H,V

Die räumliche Auflösung ist deutlich gröber als bei AMSR-E, und zwar zwischen  $45 \times 70$  km bei 19.35 GHz und  $14 \times 16$  km bei 85.5 GHz. Seit 2003 (Satellit F-16) ist das Nachfolgeinstrument SSMIS (Special Sensor Microwave Imager / Sounder) operationell, das neben den sieben SSM/I-Kanälen (mit 91 statt 85.8 GHz) auch noch 17 andere Kanäle zwischen 50 und 183 GHz hat.

## A.3 ASCAT

Das Scatterometer ASCAT (Advanced Scatterometer) misst die Radarrückstreuung der Erdoberfläche (Land, Meer, Eis) bei einer Frequenz von 5.255 GHz (C-Band) mit einer räumlichen Auflösung von etwa 30 km. Es befindet sich auf dem Satelliten MetOp-A von EUMETSAT, der seit 2006 in einem ebenfalls quasi-polaren Orbit ist. Auch mit ASCAT werden die Polargebiete täglich fast vollständig abgedeckt.

## Literatur

- Kaleschke, L., C. Lüpkes, T. Vihma, J. Haarpaintner, A. Bochert, J. Hartmann, & G. Heygster. SSM/I sea ice remote sensing for mesoscale ocean-atmosphere interaction analysis. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 27(5), 526–537, 2001.
- Markus, T. & D. Cavalieri. Snow depth distribution over sea ice in the southern ocean from satellite passive microwave data. In M. Jeffries, ed., *Antarctic Sea Ice: Physical Processes, Interactions and Variability*, no. 74 in Antarctic Research Series, pp. 19–39. American Geophysical Union, AGU, Washington, D.C., 1998.
- Markus, T., D. Powell, & J. Wang. Sensitivity of passive microwave snow depth retrievals to weather effects and snow evolution. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 44(1), 2006. doi:10.1109/TGRS.2005.860208.
- Powell, D., T. Markus, D. Cavalieri, A. Gasiewski, M. Klein, J. Maslanik, J. Stroeve, & M. Sturm. Microwave signatures of snow on sea ice: Modeling. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 44(11), 2006. doi:10.1109/TGRS.2006.882139.
- Voss, S., G. Heygster, & R. Ezraty. Improving the sea ice type discrimination by the simultaneous use of SSM/I and scatterometer data. *Polar Research*, 22(1), 35–42, 2003.