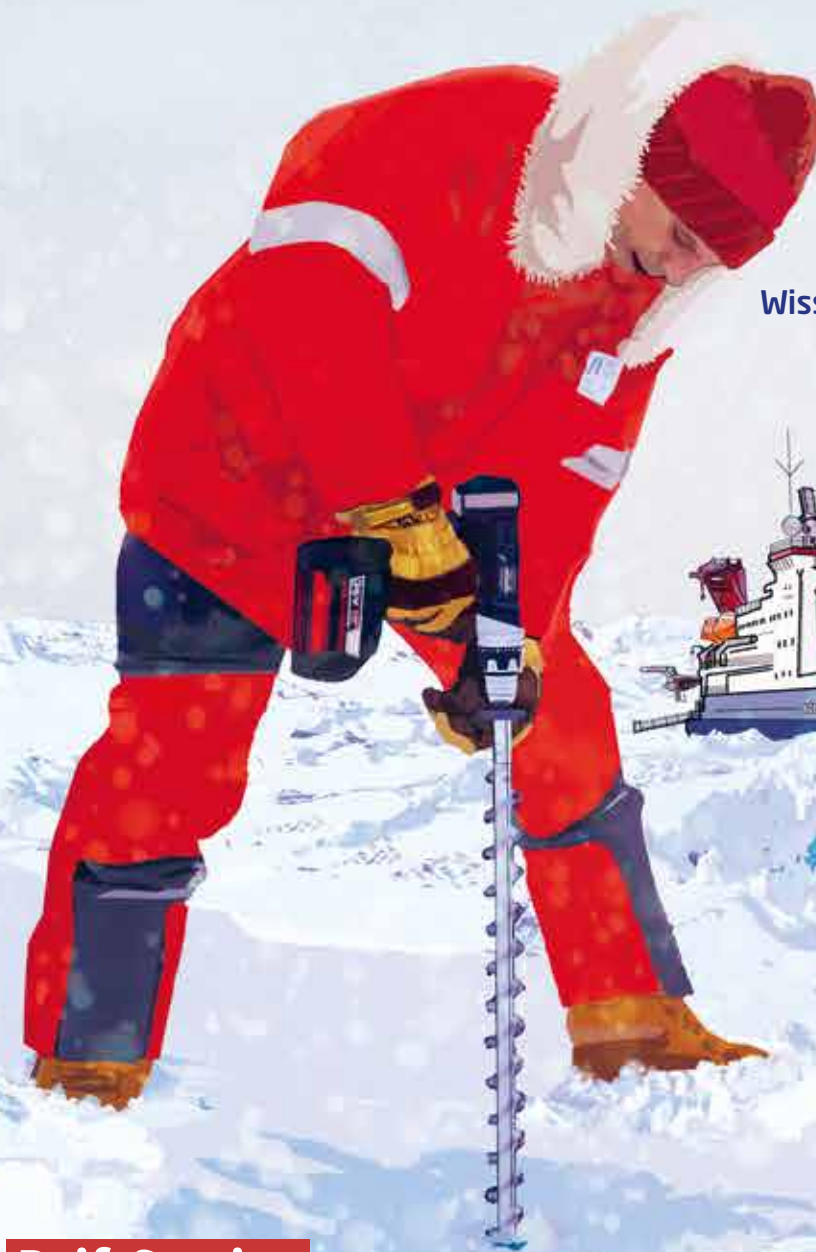


Noch nie haben Forschende das Meereis der Arktis so umfassend untersuchen können, wie auf der internationalen MOSAiC-Expedition des Forschungseisbrechers **Polarstern**. Ein Jahr lang ist das Schiff mit dem Eis durch die zentrale Arktis getrieben; ein Jahr lang haben die Männer und Frauen das Eis mithilfe modernster Technik unter die Lupe genommen.

Welche Herausforderungen es dabei zu meistern galt und was sie herausgefunden haben im polaren Hotspot des Klimawandels, erzählen sie in zehn **DriftStories**, die dieser Band vereint. Faszinierende Arktisforschung zum Anfassen - präsentiert von **meereisportal.de**.

Wissenschaftsgeschichten
aus dem Meereisportal



aus der zentralen Arktis

DriftStories

DriftStories

aus der zentralen Arktis












Ein Jahr, eine Scholle - Meereisforschung extrem





■ Auf der Suche nach einer Eisscholle bahnt sich der Forschungseisbrecher Polarstern im September 2019 seinen Weg durch die Arktis.

INHALTSVERZEICHNIS

	Inhaltsverzeichnis	Seite 05
	Ausgangspunkt einer Jahrhundertreise	Seite 12
	01 Ermittlungen auf viel zu dünnem Eis	Seite 20
	02 Für einen schärferen Blick aus dem All	Seite 26
	03 Beben und Barrikaden	Seite 34
	04 Glitzernde Wolken unter dem Eis	Seite 42
	05 Ein heißer Streifen Eis	Seite 48
	06 Schnee, die unbekannte Größe	Seite 54
	07 Das Omen des ersten Schneeballs	Seite 64
	08 Die vielen Gesichter der Kälte	Seite 72
	09 Algen in der Arktis: Nichts scheint unmöglich	Seite 86
	10 Wiedersehen am Ausgangstor der Arktis	Seite 94
	Technik-Container: Hier öffnen!	Seite 60
	Impressum/Bildnachweis	Seite 106

Spitzenforschung wird heutzutage von Frauen und Männern gleichermaßen betrieben - auch in der zentralen Arktis. Der besseren Lesbarkeit wegen aber nennen wir unsere Akteure vielerorts geschlechtsübergreifend „Wissenschaftler“. Die von uns benutzte verkürzte Sprachform hat nur redaktionelle Gründe und beinhaltet keine Wertung.



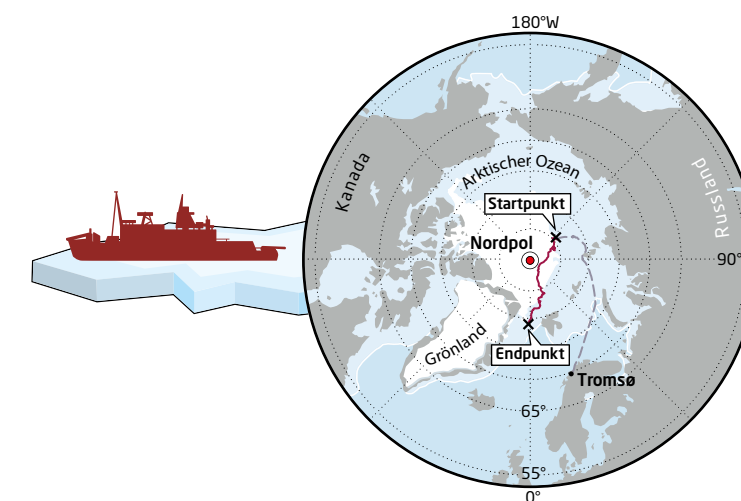
■ Eignet sich diese Scholle? AWI-Meereisphysiker Stefan Hendricks bohrt ein Loch durch das Eis, um dessen Struktur zu überprüfen.



■ Schneegestöber, Kälte und Dunkelheit zum Trotz: Im Winter in der zentralen Arktis forschen zu dürfen, ist eine einmalige Chance.



■ Armdicke Seile fesseln den Eisbrecher Polarstern an die Eisscholle. Gemeinsam treiben Schiff und Eis im Mittel 10,7 Kilometer pro Tag.



Ausgangspunkt einer Jahrhundertreise

Einen Winter lang auf einer Eisscholle im Arktischen Ozean zu forschen, blieb für die meisten Meereisspezialisten bisher ein Traum. Zu aufwendig wäre die Expedition, zu unberechenbar das polare Wetter, hieß es immer. Im September 2019 aber begann, was vorher als unmöglich galt. Der deutsche Forschungseisbrecher Polarstern ließ sich für ein Jahr im Meereis der Arktis einfrieren und bot Polarforschenden aus 20 Nationen die Chance ihres Lebens. In einem Camp auf dem Eis in der zentralen Arktis untersuchten sie rund um die Uhr das Meereis, den Ozean, die Atmosphäre und das Leben im Meer. Sie wurden Zeugen einer gigantischen Transformation des Nordpolargebietes, deren erster Verlierer vermutlich das Meereis sein wird.

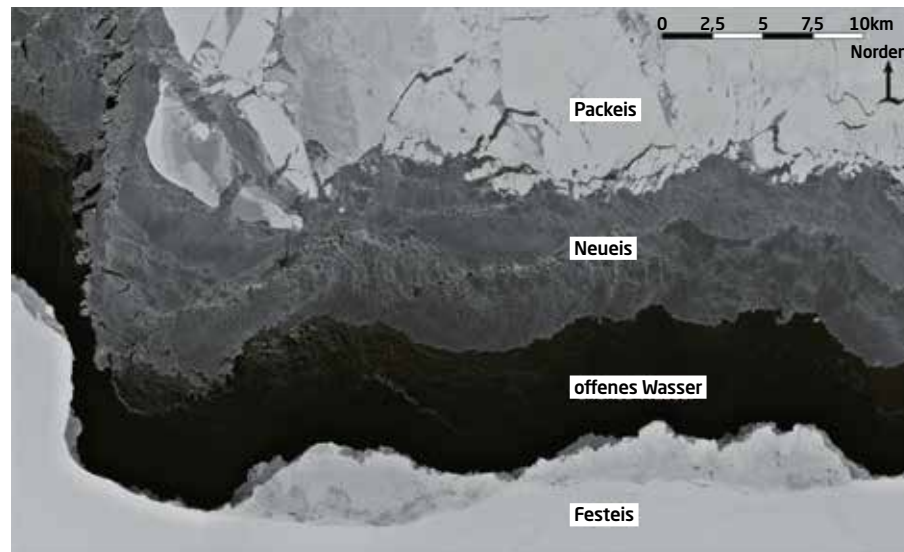
Im Schein ihrer Stirnlampe überprüft AWI-Atmosphärenforscherin Anja Sommerfeld eines ihrer Messgeräte. Während der Polarnacht ist es dauerhaft dunkel, sodass man das Gefühl für Zeit verliert.

Das prominenteste Merkmal des Arktischen Ozeans ist sein Meereis. Seit mindestens 18 Millionen Jahren und damit seit Menschengedenken wird der kleinste Ozean der Welt im Sommer wie Winter von einer Eisschicht bedeckt. Deren Fläche wächst und schrumpft im Rhythmus der Jahreszeiten. Zum Ende des Winters ist sie in der Regel zwei- bis dreimal so groß wie am Ende des Sommers.

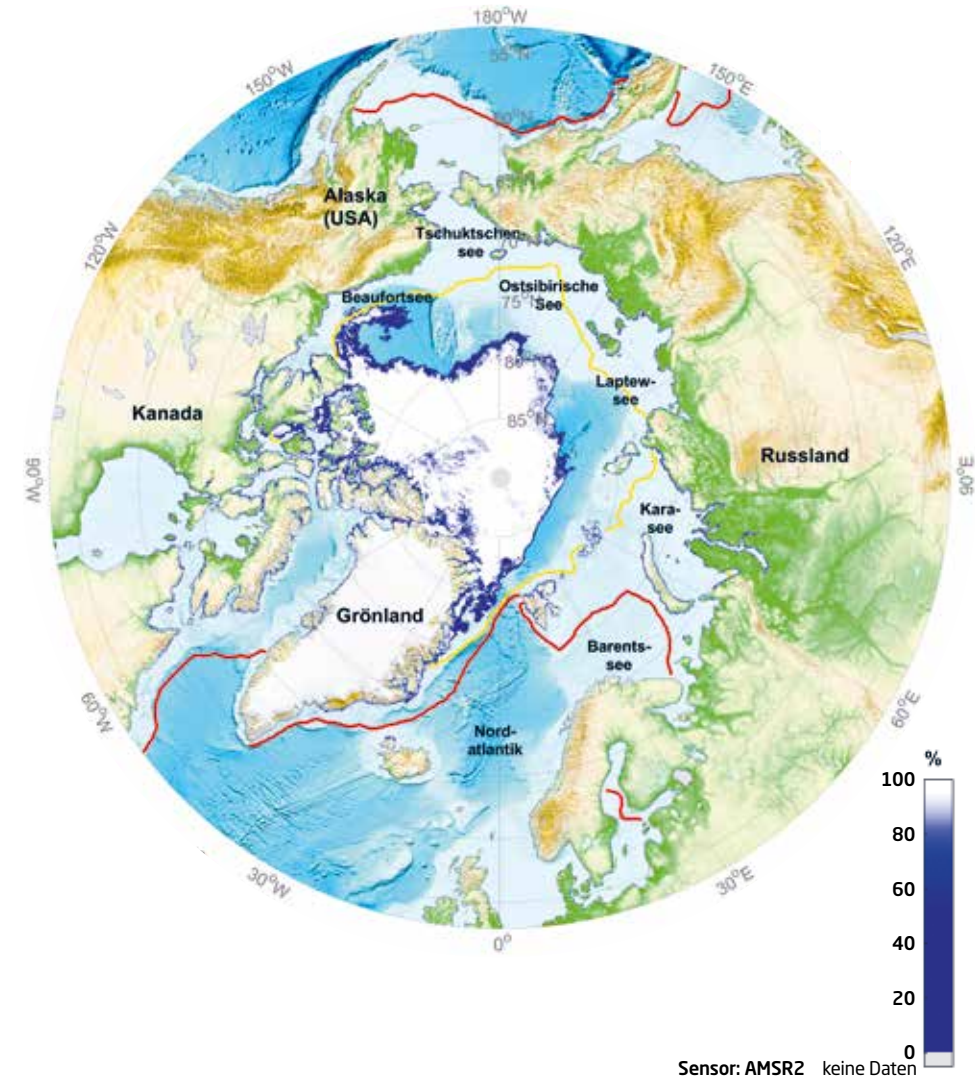
Das arktische Meereis gehört zu den wichtigsten Komponenten im Klimasystem der Erde. Die weiße Eis- und Schneedecke der Arktis reflektiert bis zu 90 Prozent der einfallenden Sonnenstrahlung und schickt diese zurück in das Weltall. Auf diese Weise kühlen Eis und Schnee nicht nur die Nordpolarregion. Sie legen auch den Grundstein für die Entstehung globaler Wind- und Meeresströmungen, welche die Wärme aus den Tropen über den gesamten Globus verteilen und die Erde zu einem für uns Menschen lebenswerten Planeten machen. Das Meereis der Arktis, soviel weiß man heute, beeinflusst das Wetter und Klima auf der gesamten Nordhalbkugel. Was in der Arktis geschieht, ist somit auch für die Abermillionen Menschen südlich des Nordpolarkreises von maßgeblicher Bedeutung.

IN DER KINDERSTUBE DES MEEREISES

Meereis entsteht vor allem in den Küstenbereichen der flachen, russischen Randmeere des Arktischen Ozeans. Dort, in der Kara- und Laptewsee sowie der Ostsibirischen See wehen im Winter starke ablandige Winde über das Meer, deren Luft bis zu minus 40 Grad Celsius kalt ist. Sie lassen immer wieder offene Wasserflächen entstehen, deren Oberfläche zu Eis gefriert, dann aufbricht und vom Wind auf das Meer hinausgeschoben wird, sodass



Dieses Satellitenbild, aufgenommen über der Laptewsee, zeigt den Prozess der Neueisbildung im März 2019. Als Festeis wird Meereis bezeichnet, welches an der Küste festgefroren ist.



Die Folgen eines viel zu warmen Sommers

Langzeitmittel 1981 - 2010 der Meereisausdehnung

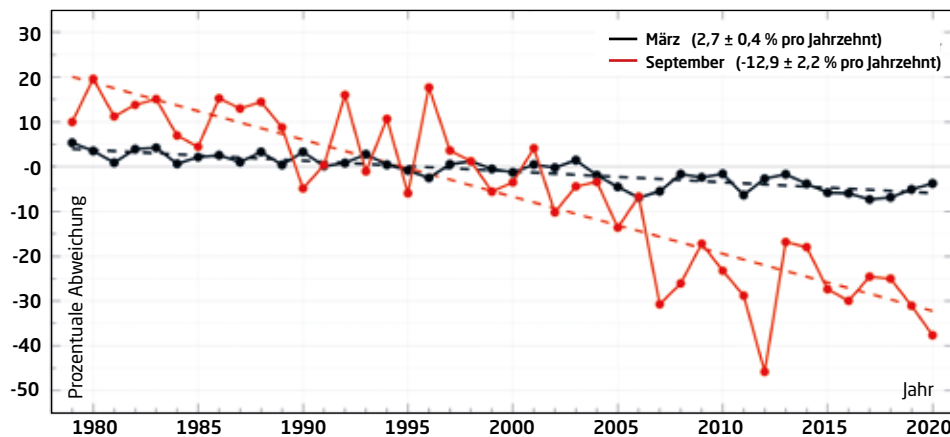
- März
- September

Zeitgleich zur MOSAiC-Expedition erlebte die Arktis einen ihrer wärmsten Sommer seit Beginn der Wetteraufzeichnungen. Infolgedessen schrumpfte die Meereisfläche bis September auf die zweitkleinste jemals von Satelliten gemessene Resteisfläche von 3,8 Millionen Quadratkilometern. Zum Vergleich: Am Ende des Winters (März 2020) bedeckte das Eis eine viermal so große Fläche (15,2 Millionen Quadratkilometer). Die Abbildung zeigt die minimale Meereiskonzentration am 9. September 2020.

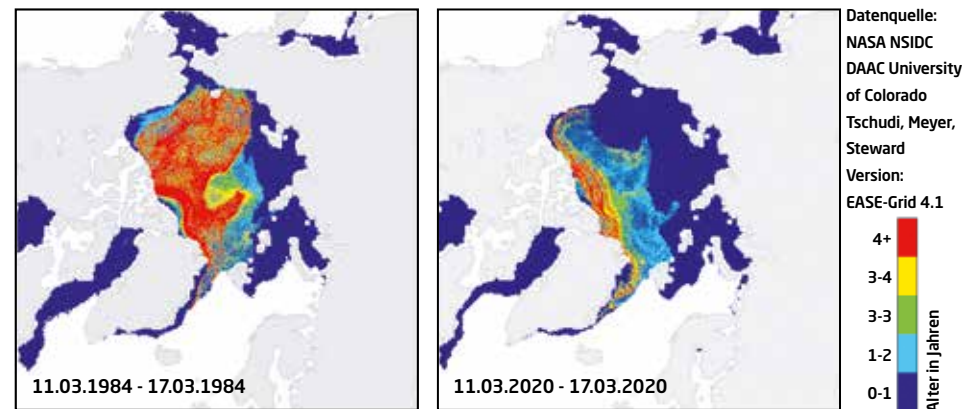
der Kreislauf von vorn beginnen kann und Meereis wie am Fließband produziert wird. Der größte Teil des Eises, welches anschließend die Meereisdecke der zentralen Arktis bildet, stammt aus dieser Region. Der restliche Teil bildet sich direkt im Umfeld des Nordpols oder aber vor den Küsten Grönlands und Nordamerikas. Weil in deren Küstenbereichen der Wind jedoch vielerorts landeinwärts weht, schiebt er das Eis nicht auf das Meer hinaus, sondern vor der Küste zusammen, sodass es dort besonders dick wird.

Die Statistiken des Wandels

ABWEICHUNG DER MEEREISAUSDEHNUNG VOM LANGZEITMITTEL 1981 - 2010



ALTER DES MEEREISES



In der Arktis gilt: Je älter und demzufolge dicker das Meereis ist, desto länger kann es im Sommer der Wärme der Sonne und des Meeres trotzen. Da mittlerweile aber nur noch ein Fünftel der Eisfläche älter als zwei Jahre ist (u.), haben Sonne und Meer immer leichteres Spiel. Im Sommer schmilzt das Eis immer großflächiger (siehe Abb. o., welche die Abweichung der Meereisausdehnung vom Langzeitmittel 1981-2010 beschreibt); im Winter gefriert es später noch bis zu jener Dicke, die das Eis benötigt, um den anschließenden Sommer zu überstehen.

DER ANFANG VOM ENDE

Das junge Meereis wächst, so lange die Luft an seiner Oberfläche kalt genug ist, dass Wärme aus dem Oberflächenwasser an der Eisunterseite durch die Scholle hindurch nach oben entweichen kann. Unter diesen Voraussetzungen gefriert nämlich das Wasser an der Schollenunterseite und das Meereis wächst von unten. Diese Ausgangsbedingungen - anhaltend kalte Luft und anhaltend kühles Oberflächenwasser - aber sind im Zuge des Klimawandels nicht mehr regelmäßig gegeben. Dramatisch steigende Luft- und Meerestemperaturen in der Arktis haben das Meereis in eine Abwärtsspirale getrieben, an deren absehbaren Ende der Arktische Ozean im Sommer eisfrei sein wird - voraussichtlich noch vor Mitte des 21. Jahrhunderts und damit in weniger als 30 Jahren. Denn die Arktis erwärmt sich mehr als doppelt so schnell wie die Erde im globalen Durchschnitt.

Vergleicht man die heutige Arktis mit den Bedingungen von vor 30 Jahren, übersteht inzwischen nur noch eine halb so große Meereisfläche den Sommer. Die 14 kleinsten Sommereisflächen seit Beginn der Satellitenmessungen im Jahr 1979 wurden allesamt in den zurückliegenden 14 Jahren gemessen (2007 - 2020). Die Eismenge - also das Volumen - hat um drei Viertel (75 Prozent) abgenommen, weil das Meereis heute deutlich dünner ist. Gleichzeitig gibt es kaum noch Schollen, die älter sind als zwei Jahre und somit ausreichend Zeit hatten, zu stattlichen, mehr als drei Meter dicken Schollen heranzuwachsen. In den russischen Randmeeren wird mittlerweile im Winter nur noch so dünnes Neueis gebildet, welches im anschließenden Frühling schmilzt, bevor es den zentralen Arktischen Ozean erreicht. Das heißt, es tritt deutlich weniger Meereis die lange, als Transpolardrift bezeichnete Reise an, welche die Eisschollen aus den russischen Randmeeren einmal quer über den Arktischen Ozean führt - vorbei am Nordpol bis in das Meeresgebiet zwischen Ostgrönland und Spitzbergen. Dort, in der Framstraße, verlässt das Eis dann den Arktischen Ozean und schmilzt in den wärmeren Gewässern des Nordatlantiks.

Welche Ausmaße der Klimawandel inzwischen in der Arktis annimmt, wurde selten so deutlich wie im Jahr 2020. Im Januar dokumentierten Wissenschaftler des Alfred-Wegener-Institutes (AWI) zunächst das zweitniedrigste Meereisvolumen seit Beginn der Messungen; die maximale Winterausdehnung im März fiel unterdurchschnittlich aus. Im April breitete sich die erste Hitzewelle des Jahres über Sibirien aus. Die Lufttemperatur über der russischen Arktis lag in dieser Zeit bis zu 6 Grad Celsius über normal. Die Wärme blieb den ganzen Sommer lang: Während auf dem Festland die sibirische Tundra brannte und Meteorologen arktische Hitzerekorde von bis zu 38 Grad Celsius meldeten, zog sich das Meereis im Eiltempo zurück. Seine Fläche erreichte im Juli einen historischen Tiefstand. Die eisfreien Meeresregionen waren nun vollends der Sonne ausgesetzt und erwärmten sich in einem solchen Maße, sodass Ozean und Atmosphäre gemeinsam die arktische Eisdecke auf ihre bisher zweitkleinste Sommer-Restfläche schrumpfen ließen. Anschließend verzögerte das warme Meer die winterliche Eisneubildung um fast vier Wochen.

Als eisfrei gilt der Arktische Ozean in der Wissenschaft, wenn die vorhandenen Eisflächen in der Summe weniger als 1 Million Quadratkilometer ergeben. Der Grund: Das dicke, küstennahe Eis in Grönland und Kanada wird später schmelzen als das Treibeis in der zentralen Arktis. Der Grenzwert ist somit ein Kompromiss.

DIE MOSAIC-EXPEDITION: EINE EINMALIGE GELEGENHEIT

Es gibt keine Zweifel mehr: Die Arktis ist eine der am stärksten vom Klimawandel betroffenen Regionen der Welt und durchläuft derzeit eine rapide Transformation. Die

einst gefrorenen Welten im Hohen Norden verlieren ihren Schutzschild aus Eis und Schnee. Wissenschaftler beobachten diese grundlegenden Veränderungen sowohl mit Satelliten aus dem All als auch auf Expeditionen sowie mithilfe vieler Messstationen und Observatorien an Land, auf dem Eis und im Meer. Ein zusammenhängendes und vor allem auch schlüssiges Bild vom Wandel der Arktis zu zeichnen, gelingt bislang jedoch noch nicht, weil die Untersuchungen in der Regel an unterschiedlichen Orten durchgeführt werden, sie zu verschiedenen Zeiten im Jahr erfolgen und so gut wie nie Meereis, Schnee, Atmosphäre, Ozean und die Biologie gleichzeitig in den Blick nehmen.

Um diese klaffende Daten- und Wissenslücke zu schließen, brauchte es ein außergewöhnliches Forschungsvorhaben. Eine Expedition in die zentrale Arktis, auf der Wissenschaftler ein ganzes Jahr lang im selben Umfeld alle relevanten Umweltparameter messen und dokumentieren konnten - sowohl im Meereis selbst als auch bis in großer Höhe darüber sowie in großer Tiefe darunter. Dass ein solcher Kraftakt nur gemeinsam gelingen könnte, war allen interessierten Wissenschaftlern schnell klar. Und so schlossen sich 20 polarforschende Nationen zusammen, um unter der Leitung des deutschen Alfred-Wegener-Institutes, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung die Jahrhundertexpedition **MOSAic** durchzuführen.

Ein Jahr lang - von Oktober 2019 bis Oktober 2020 - driftete der deutsche Forschungseisbrecher Polarstern an einer Eisscholle vertäut über den zentralen arktischen Ozean. Die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler an Bord errichteten ein großes Forschungscamp auf dem Eis, in welchem sie erstmals disziplinübergreifend Messungen von Meereis, Schnee, Ozean und Atmosphäre sowie biologische Studien durchführten - mit modernster Forschungstechnik, allen Widrigkeiten wie Dunkelheit, Sturm und polarer Eiseskälte zum Trotz.

ZEHN GESCHICHTEN AUS DEM FORSCHUNGSCAMP AUF DEM EIS

Das Redaktionsteam des **Meereisportals (meereisportal.de)** begleitete die auf das Meereis spezialisierten Expeditionsteilnehmenden bei ihrer Arbeit auf dem Eis und berichtete in seinen DriftStories über die Hintergründe, Methoden, Fortschritte und Erkenntnisse der Meereisforschung. Diese Publikation vereint alle zehn Wissenschaftsgeschichten mit dem Ziel, interessierten Leserinnen und Lesern Einblicke in die faszinierende und überraschend komplexe Welt des arktischen Meereises zu gewähren. Außerdem wollen wir Sie teilhaben lassen an dieser Expedition der Superlative: Werden Sie wie unsere Protagonisten Zeuge der arktischen Transformation und erleben Sie vielleicht ein letztes Mal die Drift des arktischen Meereises, wie wir sie bisher kennen. Die Tage des weißen Aushängeschildes der Arktis sind nämlich längst gezählt.

Die Abkürzung **MOSAic** steht für den englischen Titel der Expedition. Dieser lautet in Langform: **Multidisciplinary drifting Observatory for the Study of Arctic Climate.**

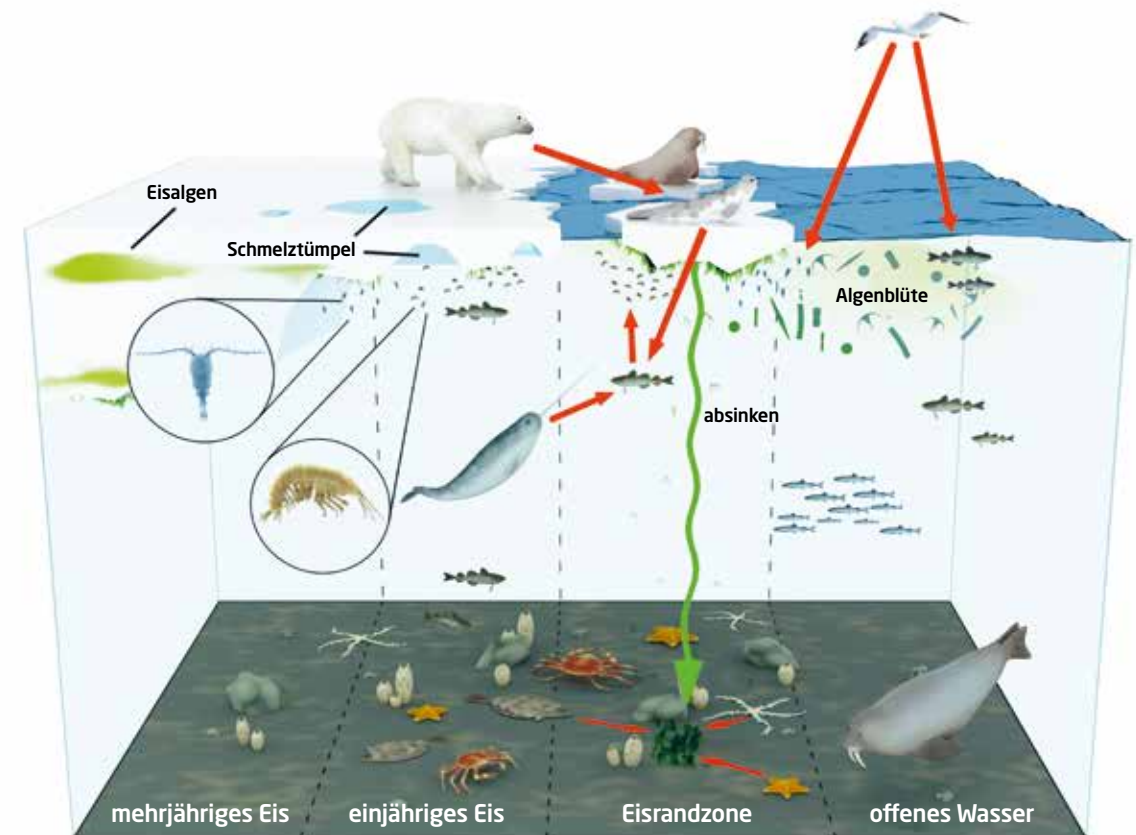
meereisportal.de ist eine unabhängige Wissens- und Datenplattform, die vom Helmholtz-Forschungsverbund Regionale Klimaänderungen und Mensch (REKLIM) und dem Klimabüro für Polargebiete und Meeresspiegelanstieg am Alfred-Wegener-Institut initiiert wurde. Sie bietet Meereis-Echtzeitdaten aus der Arktis und Antarktis sowie aktuelle Informationen zum Zustand des Meereises für jeden.

DR. KLAUS GROSFELD
REKLIM Geschäftsführer

DR. RENATE TREFFEISEN
AWI Klimabüro

SINA LÖSCHKE
Freie Journalistin

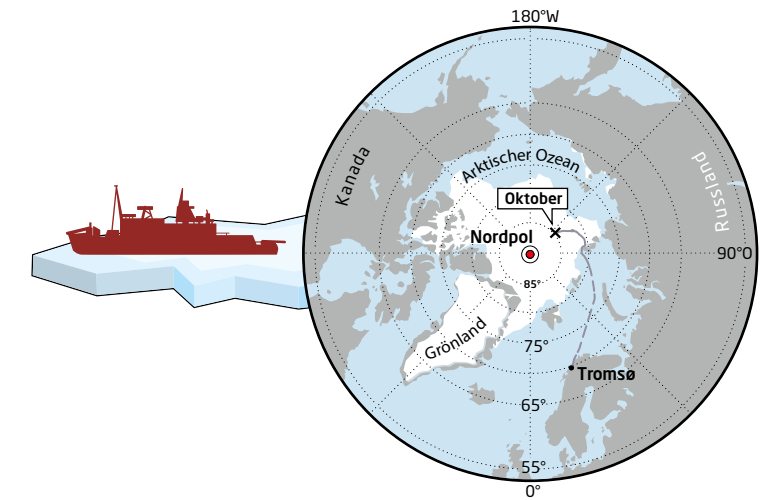
Schutzraum und Speisekammer



Das Meereis beeinflusst nicht nur die Wärmebilanz der Arktis; es legt auch den Grundstein für das Leben im Nordpolarmeer, indem es Eisalgen und Kleinstgetier (Zooplankton) als Schutzraum und Speisekammer dient. Beide Organismengruppen überdauern in den Solekanälen des Meereises den harschen Winter. Mit der Rückkehr der Sonne im Frühling vermehren sich die Eisalgen und bieten Ruderfußkrebse und anderem Zooplankton reichhaltige Nahrung. Dem Zooplankton wiederum stellen Fische wie der Polardorsch nach. Er ist eine der Schlüsselarten im Arktischen Ozean, denn auf ihn machen Wale und Robben ebenso Jagd wie Papageientaucher (l.) und andere Seevögel. Walrosse (r.) dagegen finden ihre Beute am Meeresboden. Dessen Lebensgemeinschaften leben von jenen Nahrungsresten, die von der Meeresoberfläche in die Tiefe sinken - auch für sie ist das Eis deshalb überlebenswichtig.



Ein internationales Expertenteam an Bord des russischen Forschungseisbrechers Akademik Federov (r.) unterstützte zum Auftakt der MOSAiC-Expedition die Schollensuche des Forschungsschiffes Polarstern (l.).



DriftStory 01

Ermittlungen auf viel zu dünnem Eis

Wer dem Meereis seine Geheimnisse entlocken will, muss dessen Vorgeschichte kennen. Meereisphysiker Thomas Krumpen hat daher die Spurensuche aufgenommen und die Geschichte der MOSAiC-Eisscholle bis zu ihrem Ursprung zurückverfolgt - und zwar auf den Tag genau.

AWI-Meereisphysiker Dr. Thomas Krumpen ist der „Profilierer“ im Team der **MOSAiC**-Meereisgruppe. Denn wenn auch die bislang aufwendigste Arktis-Expedition aller Zeiten keine Kriminalgeschichte ist, in der ein Täter überführt werden muss, so stellen sich für die meisten Wissenschaftler an Bord der MOSAiC-Expeditionszentrale Polarstern doch zwei grundlegenden Fragen: Woher genau kommt das Meereis, auf dem wir arbeiten? Und mit welchem Eistyp haben wir es eigentlich zu tun? Antworten darauf gilt es möglichst schon am Anfang der Expedition zu finden, bilden sie doch die Grundlage für nahezu alle Modellstudien, Satelliten-Validierungen sowie für Untersuchungen der Stoffkreisläufe und Nahrungsnetze, die im Rahmen des einjährigen Großprojektes durchgeführt werden. Thomas Krumpen ist deshalb im September 2019 als eines der ersten Mitglieder der AWI-Meereisgruppe in die zentrale Arktis aufgebrochen, im Gepäck die klare Aufgabe, ein Tatortprofil zu erstellen - will heißen: Das Meereis in der MOSAiC-Startregion bis in das kleinste Detail zu beschreiben und seine Herkunft nachzuvollziehen. Die dazu notwendigen Ermittlungen führte der 41-jährige von Bord des russischen Forschungs-

Das MOSAiC-Driftexperiment begann am 4. Oktober 2019, als das Forschungsschiff Polarstern an der ausgewählten Eisscholle festmachte. Die Startkoordinaten lauteten: 85° 04,582' Nord / 134° 25,769' Ost.



**DR. THOMAS
KRUMPEN**

forscht als Meereisphysiker am Alfred-Wegener-Institut in Bremerhaven. Der 41-jährige ist Experte für die Eisbildung in den Schelfmeeren und hat eine Methode entwickelt, mit der sich die Route des Treibeises zuverlässig zurückverfolgen lässt.

eisbrechers Akademik Federov durch, welcher FS Polarstern dabei unterstützt hat, das Meeresgebiet etwa 950 Kilometer nördlich der Neusibirischen Inseln zu erkunden. Um einen ersten Überblick zu gewinnen, begaben sich beide Schiffe in aufeinander abgestimmte Suchregionen und gingen dort jeweils ähnlich vor: Von der Akademik Federov dokumentierte Thomas Krumpen, wie viele Eisschollen in der Zielregion trieben, wie alt und dick das Eis in etwa war, an welchen Stellen sich Risse im Packeis bildeten, ob die Eisdecke von Schmelztümpeln bedeckt wurden oder aber ob sich die Schollen zu sogenannten Presseisrücken auftürmten. Anschließend flogen die Wissenschaftler mit dem Bordhubschrauber fünf größere Schollen in einem Umkreis von 40 Kilometern an und vermaßen vor Ort die Eisdicke und die Höhe der aufliegenden Schneedecke. Thomas Krumpen stellt dann diese Vorort-Ergebnisse einer Vielzahl von Wetter- und Eissatellitendaten aus der russischen Arktis gegenüber, die er bereits im Vorfeld der Expedition aus unterschiedlichen Quellen zusammengetragen hatte. Die Wetterdaten stammten dabei von einer Wetterstation auf der Kotelny-Insel, der größten Insel im Verbund der Neusibirischen Inseln.

EINE VERGANGENHEIT DER EXTREME

Die erste Analyse in beiden Suchregionen fiel ernüchternd aus. Das Eis in der MOSAiC-Startregion war nicht einmal ein Jahr alt, im Mittel nur 30 Zentimeter dick, im Laufe des Sommers großflächig angeschmolzen und infolgedessen stark verwittert und von Schmelztümpeln überzogen. Die Eckdaten seiner Lebensgeschichte lasen sich wie die Aneinanderreihung von Negativrekorden. „Der Sommer 2019 war der wärmste Sommer in der russischen Arktis seit Beginn der Wetterbeobachtungen auf der Kotelny-Insel im Jahr 1935. Die Lufttemperaturen über der Laptewsee und der Ostsibirischen See übertrafen den bisherigen Spitzenwert um zwei bis vier Grad Celsius“, berichtet Thomas Krumpen. Weil auch der vorhergehende Winter im Durchschnitt um bis zu drei Grad Celsius wärmer war als im Vergleichszeitraum 1981 bis 2010, hatte sich im sogenannten „Kindergarten“ des arktischen Meereises – der Laptewsee und der benachbarten Ostsibirischen See – deutlich dünneres Eis gebildet als dies in der Vergangenheit der Fall war. Starke, ablandige Winde schoben es anschließend mit Spitzengeschwindigkeit auf das offene Meer hinaus. Als im Frühjahr 2019 die Lufttemperatur anstieg, schmolz dieses überproportional dünne Eis so schnell und großflächig, dass der früheste Zerfall der Eisdecke seit dem Jahr 1992 beobachtet wurde, und sich die Eisrandzone auf unvorhergesehene Weise Richtung Norden zurückzog. Im Herbst 2019 dauerte es dann länger als jemals zuvor, bis sich das von der Sommersonne aufgeheizte Wasser an der Meeresoberfläche so weit abkühlte, dass neues Eis entstehen konnte. „Am Anfang unserer Expedition bestanden rund 80 Prozent des Meereises in der MOSAiC-Startregion aus Eis, welches sich erst wenige Tage zuvor gebildet hatte. Schollen, die den Sommer überlebt hatten und somit dick genug waren, dass wir darauf hätten forschen können, waren fast schon die Ausnahme und nur schwer zu finden“, erzählt der Meereisphysiker. Schließlich wurden die Wissenschaftler aber in der Suchregion des FS Polarstern fündig: Dort wählte die Expeditionsleitung eine der stabilsten Schollen in diesem Sektor der Arktis als Heimat für die Expedition aus.

FÄHRTENSUCHE MIT EISSATELLITEN

Basierend auf dieser Ausgangslage begann für Thomas Krumpen nun die eigentliche Detektivarbeit. Es galt, die Wanderung des Packeises aus dem MOSAiC-Startgebiet bis zu seinem Ursprungsort zurückzuverfolgen. Dazu benutzte der Experte für Meereis-Fernerkundung eine Zeitreihe hochauflösender Satellitendaten, auf denen er die MOSAiC-Schollen identifizieren und somit ihre Reise aus den **Randmeeren** des Arktischen Ozeans in die zentrale Arktis rekonstruieren konnte – und das auf den Tag genau. „Die Eisschollen, auf denen wir unser MOSAiC-Messnetzwerk aufgebaut haben, haben sich am 5. Dezember 2018 an der Nordküste der Neusibirischen Inseln gebildet, in einem Flachwasserbereich mit einer Wassertiefe von weniger als zehn Metern. Als FS Polarstern dann am 4. Oktober 2019 an einer dieser Schollen anlegte, war dieses Eis genau 318 Tage alt und hatte auf seinem vom Wind bestimmten Zickzackkurs bereits eine Strecke von insgesamt 2240 Kilometern zurückgelegt“, berichtet Thomas Krumpen.

Untermauert werden diese neuen Erkenntnisse zur Herkunft des Eises unter anderem durch Sediment- und Partikelablagerungen, welche die Forschenden im Meereis gefunden haben. Zu solchen Einschlüssen kommt es nur, wenn das Meereis in Küstenabschnitten mit einer Wassertiefe von weniger als 30 Metern entsteht. In Flachwasserbereichen wirbelt der starke Winterwind nämlich jede Menge Sedimente vom Meeresboden auf, die

Als Rand- oder Schelfmeere werden folgende flachen Meeresgebiete im östlichen Teil des Arktischen Ozeans bezeichnet: Barentssee, Karasee, Laptewsee und Ost-sibirische See.



Schollensuche: Ein russischer Transporthubschrauber setzt Wissenschaftler für Vorerkundungen auf dem Meereis ab.

dann beim Gefrieren des Wassers im Eis eingeschlossen werden. Oder aber die Partikel lagern sich an, wenn das noch junge Eis im Brandungsbereich den Meeresboden berührt. Von welchem Küstenabschnitt genau die Einlagerungen stammen, sollen chemische Untersuchungen ergeben, die allerdings noch nicht abgeschlossen sind.

EIN LETZTER BLICK AUF DIE ALTE ARKTIS

Die unerwartet vielen Einschlüsse geben den Teilnehmenden der MOSAiC-Expedition nun die Chance, die Rolle des arktischen Meereises als Transportmittel für Sedimente, Nährstoffe, klimarelevanten Gase und Giftstoffe nochmals gründlich zu untersuchen. Eine Gelegenheit, die sich nach Meinung von Thomas Krumpen künftig immer seltener bieten wird: „Als Folge des Klimawandels schmilzt mittlerweile das meiste in den Randmeeren gebildete Meereis, bevor es die zentrale Arktis erreicht. Das bedeutet, wichtige Transportprozesse reißen ab und verändern die Stoffkreisläufe im Arktischen Ozean. In MOSAiC schauen wir jetzt ein letztes Mal auf die Arktis, wie wir sie bisher kannten und in den zurückliegenden Jahrzehnten erforscht haben. Gleichzeitig aber bekommen wir auch einen ersten Eindruck davon, wie die Dinge vermutlich in Zukunft sein werden.“ Die Tage der alten Arktis, da ist sich der Meereis-Profiler sicher, sind gezählt. ■



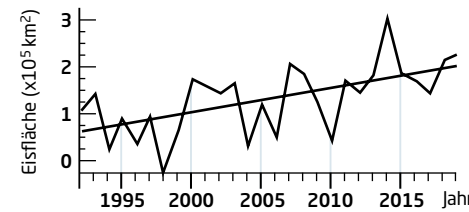
Aus Sicherheitsgründen arbeiten die Wissenschaftler immer im Team. Es gilt nämlich auch, nach Eisbären Ausschau zu halten.

MOSAIC-Eisscholle: Ein viel zu warmes erstes Jahr

Folgende Umweltprozesse haben dazu beigetragen, dass die MOSAiC-Eisscholle im Alter von einem Jahr deutlich dünner und instabiler war, als es die Wissenschaftler erwartet hatten.

Windgetriebener Eisexport (März-April, 1992-2019)

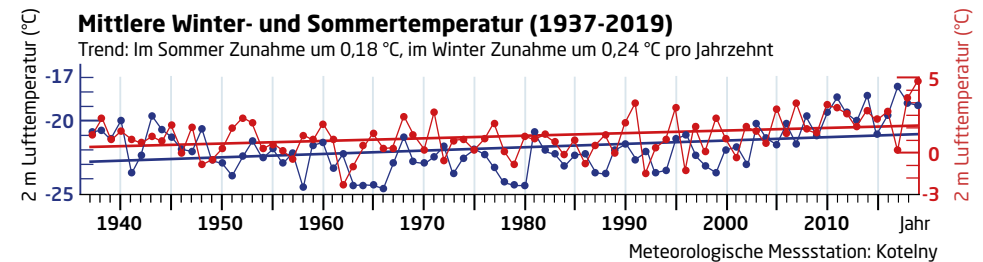
Trend: Zunahme von 53.000 km² pro Jahrzehnt



Starke ablandige Winde haben am Ende des Winters 2018/2019 kurzfristig große Eisflächen aus den russischen Schelfmeeren Richtung zentrale Arktis geschoben (Eisexport). Dadurch entstanden in Küstennähe neue offene Wasserflächen - sogenannte Polynjen - in denen sich neues Eis bilden konnte.

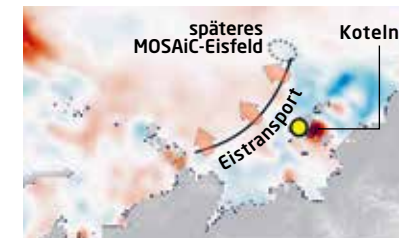
Mittlere Winter- und Sommertemperatur (1937-2019)

Trend: Im Sommer Zunahme um 0,18 °C, im Winter Zunahme um 0,24 °C pro Jahrzehnt

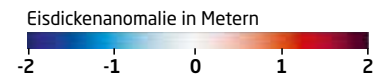


Eisdickenunterschiede

(CryoSat/SMOS-Messung; Differenz zwischen April 2019 und April 2010-2018)

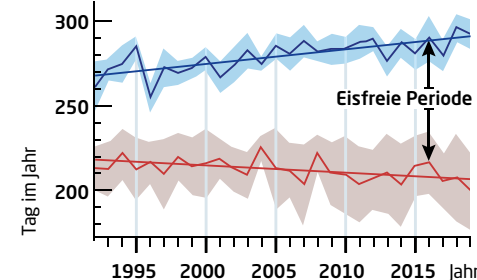


Bedingt durch den warmen Winter in 2018/2019 (o. blau) fiel die Neueisbildung allerdings deutlich geringer aus. Deshalb war das Packeis am Ende des Winters (April 2019) deutlich dünner (l.) als in den vorangegangenen Jahren. Rekordtemperaturen im darauffolgenden Sommer (o., rot), gemessen an der Wetterstation Kotelny (l., gelber Punkt) ...



Zeitpunkt des Eisaufruchs und des Zufrierens der Schelfmeere

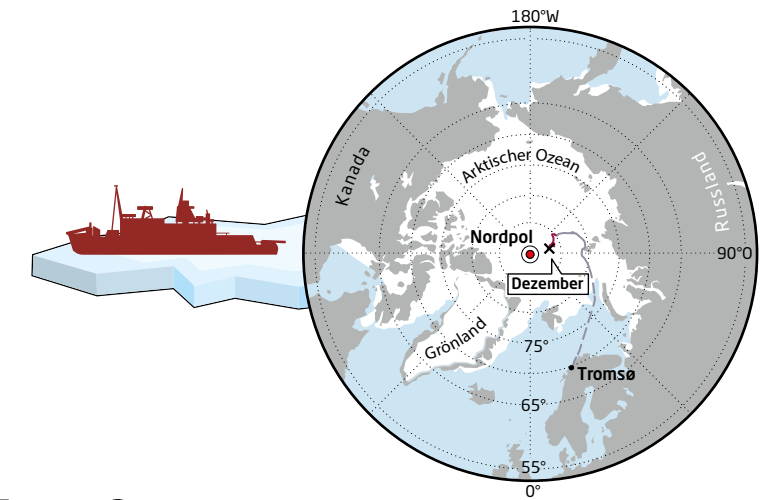
Trend: 8,5 Tage späteres Zufrieren (blau) und 3,8 Tage früheres Aufbrechen (rot) pro Jahrzehnt



... haben das verbleibende dünne Eis dann schnell schmelzen lassen. Satelliten verzeichneten im Jahr 2019 den wohl frühesten Eisaufruch in der Lapteewsee seit Beginn der Aufzeichnungen. Infolge der anhaltend hohen Sommertemperaturen dokumentierten Wissenschaftler auch Rekord-Wassertemperaturen. Diese Wärme im Meer verzögerte im September 2019 das Zufrieren der Schelfmeere.



Mit diesem Radar-Messgerät untersuchten die Forscher, wie genau sich die Schneehöhe auf dem Meereis mit Satellitenmessverfahren bestimmen lässt.



DriftStory 02

Für einen schärferen Blick aus dem All

Satellitenbeobachtungen sind der einzige Weg, das arktische Meereis großflächig im Blick zu behalten. Noch aber haben die Messungen aus dem All Schwächen. Einzigartige Kontrollmessungen im Rahmen der MOSAiC-Expedition werden jetzt helfen, diese zu überwinden.

Als Dr. Gunnar Spreen am Abend des 19. November 2019 von der Schiffsbrücke des Forschungseisbrechers Polarstern schaut, sieht er, wie sich im Scheinwerferlicht plötzlich jener Teil der MOSAiC-Eisfläche am Schiff vorbeischiebt, auf dem die Messinstrumente seiner Fernerkundungsgruppe stehen. Die Eisbewegung entlang eines langen Risses stoppt nach etwa 500 Metern. Dennoch weiß der Physiker von der Universität Bremen, dass seine Gruppe nun gezwungen sein wird, sich ein neues Messfeld zu suchen. Durch die Bewegung haben sich nämlich dort, wo die Fernerkundungsmessgeräte bislang standen, viele kleinere Risse im Eis gebildet. Durch sie ist Meerwasser in die Schneedecke auf dem Eis eingedrungen und hat sie in salzigen Schneematsch verwandelt. Die Schneedecke ist somit unbrauchbar für die vielen Messungen, mit denen die Wissenschaftler sie in den kommenden Monaten untersuchen wollten. Schnee ist nämlich bis heute einer der größten Unsicherheitsfaktoren bei der Fernerkundung von Meereis und einer der Gründe, warum Satellitenexperten an der bislang aufwendigsten Schiffsexpedition in die zentrale Arktis teilnehmen.



EIN IDEALES WERKZEUG

Satelliten kommen seit mehr als 40 Jahren in der Meereisforschung zum Einsatz. Auf ihren Messungen basieren einige der wichtigsten Erkenntnisse zum Klimawandel, so zum Beispiel unser Wissen zum flächendeckenden Rückgang des arktischen Meereises. Satellitenbasierte Eiskarten werden inzwischen in der polaren Schifffahrt genutzt und können auf Onlineportalen quasi in Echtzeit von jedermann abgerufen werden.

Mittlerweile überfliegen mehr als 20 Satelliten zur Meereisbeobachtung die Polarregionen. Die meisten von ihnen kreisen in einer Höhe von 600 bis 800 Kilometern um die Erde. Sie erreichen ein Tempo von sieben Kilometer pro Sekunde (25.000 km/h) und umrunden die Erde pro Tag gut 14-mal. Einige dieser Satelliten blicken mit sogenannten optischen Sensoren auf die Arktis und Antarktis herab. Das heißt, sie machen ähnlich wie ein Fotoapparat Bilder. Brauchbar sind ihre Aufnahmen jedoch nur im Frühling, Sommer und Herbst, wenn die Sonne über dem Horizont steht und die polaren Landschaften flächendeckend ausleuchtet. Außerdem dürfen Wolken den Blick auf die Eisflächen nicht versperren.

Gunnar Spreen, vom Institut für Umwelphysik der Universität Bremen, beobachtet hingegen das Meereis mithilfe sogenannter Mikrowellensensoren. Diese liefern auch bei Polarnacht und bei wolkenverhangenem Himmel einzigartige Daten. Zum Einsatz kommen dabei zwei grundsätzlich verschiedene Messverfahren – eines mit aktiven Mikrowellensensoren (Radarmessung) und eines mit passiven Sensoren (Radiometermessung).



Physiker Gunnar Spreen ist auf die Polarstern-Brücke gekommen, um auf dem Eisradar des Schiffes die Bewegungen des Meereises rund um den Eisbrecher zu überprüfen (l.). Einmal haben er und sein Team die zehn Fernerkundungsmessgeräte schon umziehen müssen, nachdem sich dicht neben deren erstem Messfeld ein Riss im Eis gebildet hatte.

Trägt ein Satellit einen aktiven Mikrowellensensor, gibt dieser langwellige (Millimeter bis Dezimeter), nichtsichtbare elektromagnetische Strahlung Richtung Erde ab und misst entweder, welcher Anteil dieses Signals vom Meereis reflektiert wird oder aber wieviel Zeit vergeht, bis das Signal die Eisdecke erreicht hat und wieder zum Sensor zurückgestrahlt wird. Die reflektierte Energiemenge erlaubt Rückschlüsse auf die Oberflächenstruktur und das Alter des Eises. Von der Laufzeit des Signals wiederum können die Physiker ableiten, wie weit das Meereis aus dem Meer emporragt. Dieser Höhenwert ermöglicht es ihnen dann, die Gesamtdicke des Eises zu berechnen.

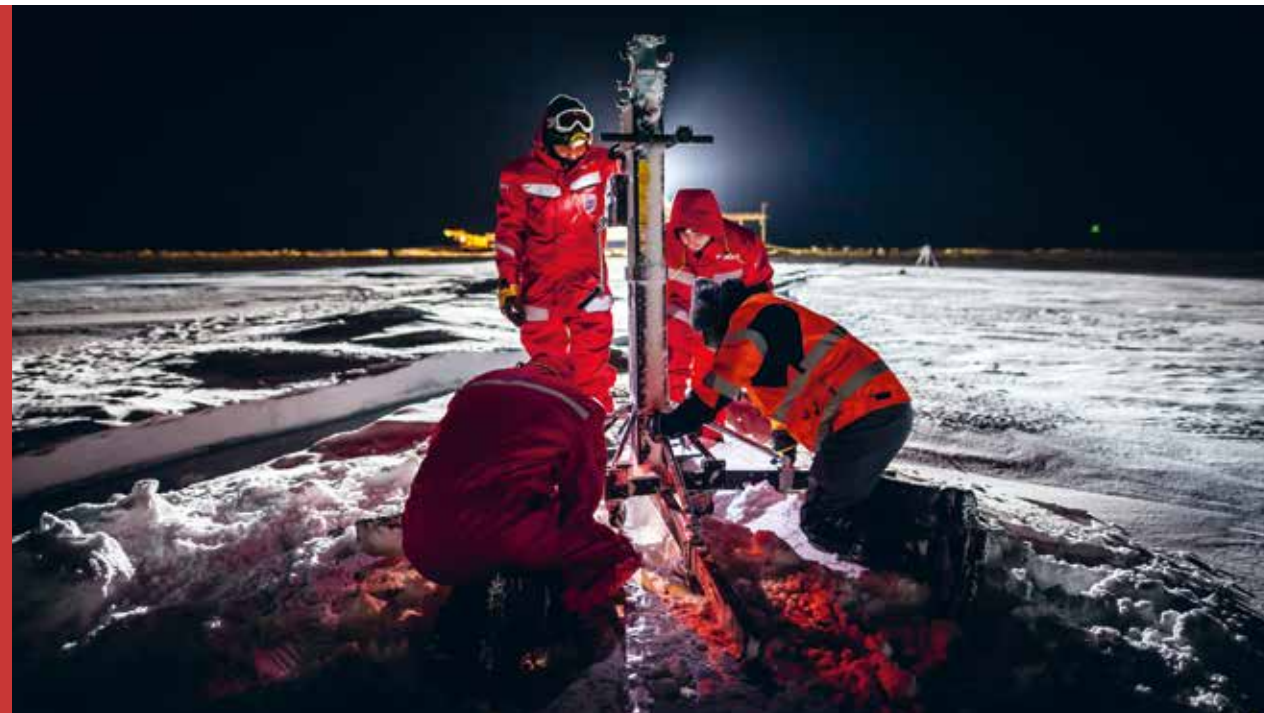
Passive Mikrowellensensoren dagegen senden kein Signal aus. Diese sogenannten Radiometer messen einzig und allein, wieviel langwellige Strahlung das Meereis aufgrund seiner Temperatur eigenständig an die Umgebung abgibt. Dazu muss man wissen, dass jeder Körper mit einer Temperatur über dem absoluten Nullpunkt von $-273,15$ Grad Celsius Strahlung im Infrarot- und Mikrowellenbereich emittiert. Schnee und Meereis haben eine Grundtemperatur von minus 1,8 Grad Celsius an der Eisunterseite, bis minus 30 Grad Celsius an der Oberfläche und strahlen demzufolge auch Energie ab. Der Anteil der abgegebenen Mikrowellenstrahlung ist zwar um ein Vielfaches kleiner als die Strahlung im Infrarotbereich, dafür aber wandern die Mikrowellen nahezu ungestört durch Wolken und Atmosphäre. Satelliten können sie deshalb ziemlich genau aus dem Weltall vermessen – und zwar rund um die Uhr, an 365 Tagen pro Jahr.

„Satelliten sind das einzige Werkzeug, mit dem wir das Meereis der Polarregionen jederzeit flächendeckend beobachten können“, sagt Gunnar Spreen. „Die große Herausforderung dabei ist jedoch, dass wir wichtige Eiseigenschaften wie Fläche, Dicke, Alter oder Eiskonzentration nie auf direktem Wege messen. Stattdessen erfassen die Satelliten physikalische Größen wie die Mikrowellen-Helligkeitstemperatur, die wir erst umwandeln müssen, bevor Aussagen über das Meereis möglich sind“, ergänzt der Physiker.

SCHNEE IST NICHT GLEICH SCHNEE

Für diese Berechnungen benutzen die Wissenschaftler spezielle Algorithmen, in denen in Gleichungen beschrieben ist, welche physikalischen Prozesse zum Beispiel ablaufen, wenn Mikrowellen auf Schnee treffen, in ihn eindringen und von ihm gestreut und reflektiert werden. Die Genauigkeit dieser Methoden aber lässt bislang noch zu wünschen übrig, denn Schnee ist keine verlässliche Konstante. Im Gegenteil, er verändert sich ständig und mit ihm seine Rückstreuungseigenschaften.

„Frisch gefallener Schnee zum Beispiel besteht aus ganz locker aufeinanderliegenden Flocken und ist für Mikrowellenstrahlung quasi transparent. Wir sehen nur das darunter liegende Eis“, erklärt Gunnar Spreen. Wird der Schnee dagegen älter, verklumpen sich die



Umzug der Messgeräte: Dieses Bild vom Abbau eines der Instrumente zeigt, der Riss im Eis ist keine zwei Meter entfernt.

Flocken zu größeren Schneekörnern. Diese sind dann durchaus in der Lage, das Mikrowellensignal zurückzustreuen. Ähnliche Effekte stellen sich ein, wenn der Wind, wie in den ersten MOSAiC-Wochen geschehen, über die Schneedecke fegt und ihre Oberfläche verdichtet. „Die Rückstreuungseigenschaften ändern sich dann grundlegend. Schnee ist eben nicht gleich Schnee“, formuliert es der Experte.

Zu welchen Messfehlern eine verhärtete Schneeoberfläche führen kann, erläutert Gunnar Spreen an einem Beispiel: „Wenn wir mit dem **CryoSat**-Radaraltimeter die Eisdicke vermessen, gehen wir bei unseren Berechnungen grundsätzlich davon aus, dass das Satellitensignal am Übergang von Schnee zu Eis reflektiert wird. Mittlerweile aber wissen wir, dass das nicht immer der Fall ist. Verdichtet sich zum Beispiel die Oberflächenschicht aufgrund des Windes oder bilden sich Eislinsen im Schnee, kann es sein, dass unser Signal nicht mehr an der Schnee-Eis-Grenzschicht zurückgestrahlt wird, sondern weiter oben im Schnee. Berechnen wir dann auf Basis dieser Abstandsmessung die Eisdicke, schleicht sich automatisch ein Fehler ein.“

SATELLITENTECHNIK AUF DEM EIS

Um solche Fehlerquellen zu identifizieren, haben die Satellitenexperten für die MOSAiC-Expedition ihre Satellitentechnik sprichwörtlich auf das Eis geholt. Am Fernerkundungsmessfeld sind zehn hochempfindliche Messinstrumente aufgebaut, welche dieselben Sensoren tragen wie die Satelliten im Weltall. Sie alle sind auf dieselbe Eis- und Schneefläche gerichtet, sodass die Forschenden viele verschiedene Messungen parallel durchführen und Eis und Schnee mit Mikrowellensignalen in verschiedenen Frequenzen untersuchen können. Gleichzeitig erfassen die Meereisphysiker Eisparameter wie Schollendicke, Salzgehalt und Schneehöhe auch auf herkömmliche physikalische Weise, um diese Echtzeitdaten im Anschluss dann mit den von den Mikrowellendaten abgeleiteten Eiskennzahlen abzugleichen.

„Wir wollen ganz genau verstehen, was mit unseren Satellitensignalen im Schnee und Eis passiert und wie sich die Rückstreuung und die Abstrahlung im Laufe der Jahreszeiten verändern“, sagt Gunnar Spreen. Dazu fehlten bislang nämlich grundlegende Daten, vor allem aus der **Polarnacht**. Im Rahmen von MOSAiC haben die Forschenden nun erstmals die Chance, die Prozesse im Eis und im Schnee auf einer Scholle ein Jahr lang zu beobachten: Angefangen im Winter mit Schneestürmen und eisigen minus 30 Grad Celsius Lufttemperatur; gefolgt vom Frühling, in dem sich der Schnee erwärmen und der Flüssigwasseranteil steigen wird, bis hin zum Sommer, wenn sich das Schmelzwasser in vielen Tümpeln sammelt und das Eis so löchrig sein wird wie ein Schweizer Käse.

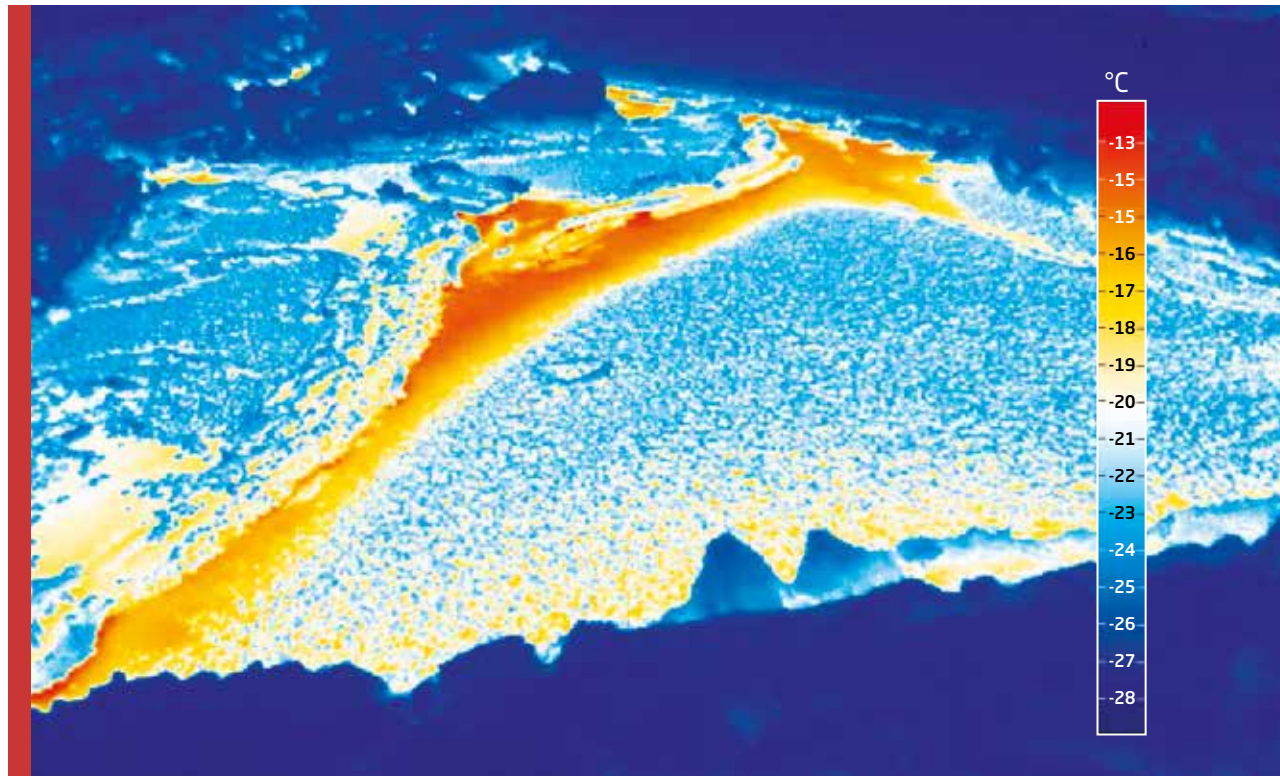
Aufgrund dieser einmaligen Gelegenheit beteiligen sich 13 Forschungsinstitutionen mit ihrer Satellitenmesstechnik an den aufwendigen Untersuchungen. Das MOSAiC-Satellitenvalidierungsprogramm ist somit der bislang größte internationale Versuch, die Genauigkeit der Fernerkundungsmethoden für Meereis zu verbessern. Bis klare Fortschritte vermeldet werden können, liegt aber noch viel Arbeit vor den Wissenschaftlern – und dass ändern in und dies nicht nur, weil das Fernerkundungsmessfeld nach der plötzlichen Eisbewegung im November an einen neuen Standort verlegt werden musste. „Wenn wir alle

CryoSat-2 heißt ein Satellit der Europäischen Raumfahrtagentur, der ausschließlich die Eismassen der Erde untersucht. Er ist mit einem Radaraltimeter ausgestattet, welches sowohl die Höhe des Meereises vermisst als auch Höhenveränderungen der Eisschilde in Grönland und der Antarktis.

Als Polarnacht wird jene Phase des Jahres bezeichnet, in der die Sonne in der Arktis nicht über den Horizont steigt. Während südlich des 78 Breitengrades Nord dann trotzdem noch etwas Dämmerlicht zu sehen ist, bleibt es nördlich davon nahezu 24 Stunden am Tag stockfinster.

Vor-Ort-Daten zu den Wechselwirkungen von Mikrowellen mit Schnee und Eis gesammelt haben, werden wir diese auswerten und versuchen, die physikalischen Prozesse besser zu verstehen. Im Anschluss gilt es dann, diese Prozesse in Form von verbesserten Gleichungen in unsere Algorithmen zur Datenauswertung einzubauen. Wenn uns das gelungen ist, können wir die Algorithmen auf die Satellitendaten anwenden und überprüfen, ob die Unsicherheiten abgenommen haben“, erklärt Gunnar Spreen.

Ein konkretes Ergebnis aber haben die MOSAiC-Schnee- und Eismessungen schon jetzt gebracht. Ein neues Zwei-Frequenz-Messverfahren zur Bestimmung der Schneedicke auf dem Meereis hat bei den Messungen auf der MOSAiC-Scholle überzeugt. „Dieses Zwei-Frequenz-Radaraltimeter wird künftig auf einem neuen europäischen Satelliten „CRISTAL“ eingesetzt. Es misst die Schneedecke, indem das Signal der höheren Frequenz nahe der Schneeoberfläche reflektiert wird, während die Wellen der tieferen Frequenz am Schnee-Eis-Übergang zurückgestrahlt werden“, erläutert Gunnar Spreen. Die Differenz beider Werte ergibt am Ende die Schneehöhe, leichte Unsicherheiten eingeschlossen. „Bei unseren Testmessungen auf dem Eis konnten wir beobachten, wie die beiden Signale im Detail reflektiert werden. Dieses Wissen werden wir jetzt in die Algorithmen übertragen und



Diese Infrarotaufnahme zeigt dünnes Neueis. Durch einen Riss steigt Meerwasser auf, das deutlich wärmer ist als das Eis.

auf diese Weise die Unsicherheit in den Messungen reduzieren, noch bevor der Satellit im Weltall kreist“, erläutert der Physiker.

Neben „CRISTAL“ unterstützt die MOSAiC-Fernerkundungsgruppe noch eine zweite zukünftige Satellitenmission der ESA mit Vor-Ort-Messungen auf dem Eis. Das Copernicus Imaging Microwave Radiometer – kurz CIMR genannt – wird die Eis- und Schneeeigenschaften künftig mit fünf verschiedenen Mikrowellenfrequenzen messen und den Wissenschaftlern so die Möglichkeit eröffnen, die Eisfläche und -dicke, die Höhe der Schneedecke sowie die Eisbewegungen besser zu beobachten.

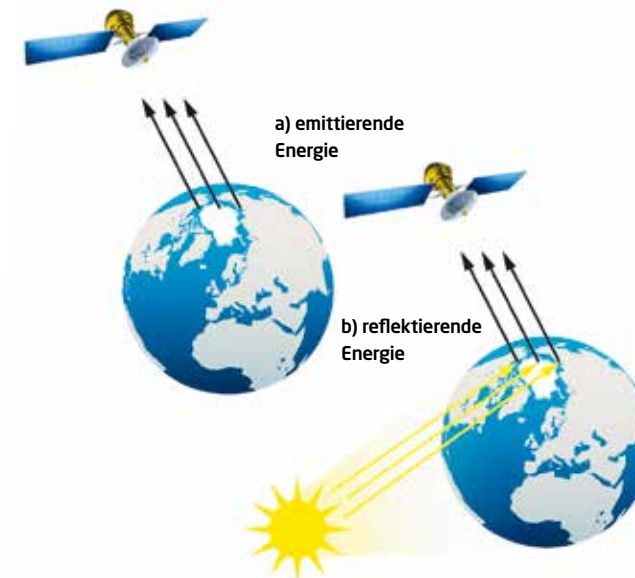
Dem Ausreißversuch der mit Messinstrumenten beladenen Eisfläche im November kann Gunnar Spreen inzwischen auch etwas Gutes abgewinnen: „Wenige Tage zuvor hatte sich schon ein etwa zwei bis drei Meter breiter Riss durch unser Messfeld gezogen. Bei einer Lufttemperatur von minus 30 Grad Celsius ist die oberste Wasserschicht dann schnell wieder gefroren, was uns die einmalige Möglichkeit eröffnete, dieses ganz dünne Eis mit seinen Frostblumen zu vermessen. In der Polarnacht auf dem arktischen Meereis zu arbeiten und dabei zu sehen und zu hören, wie schnell sich dieser Naturraum durch Wind und Meer verändert, war ein wirklich faszinierendes Erlebnis!“ ■

Wie Satelliten das Meereis vermessen

Passive Fernerkundung

Messung natürlich vorhandener Energie

- emittierte Energie (a): Infrarot- und Mikrowellenlängen (bei Tag und Nacht)
- reflektierte Energie (b): sichtbare Wellenlängen (nur bei Tageslicht)



Aktive Fernerkundung

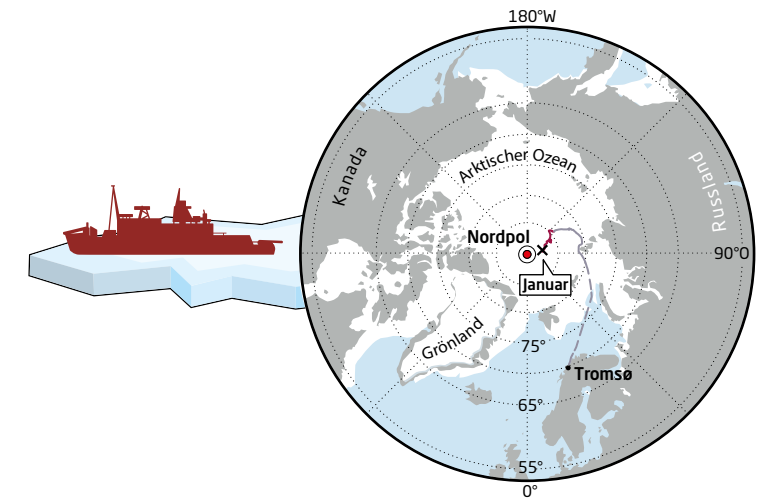
Satellitensensor erzeugt ein Signal und erfasst die rückgestreute und reflektierte Strahlung

- unabhängig von Lichtverhältnissen und somit bei Tag und Nacht einsetzbar
- bietet oft bessere Auflösung als passive Systeme





Das arktische Meereis ist keine ebene, spiegelglatte Eisfläche. Im Gegenteil. Überall dort, wo Eisschollen zusammenstoßen oder gegeneinandergedrückt werden, türmen sich sogenannte Presseisrücken auf. Diese können bis zu 20 Meter hoch werden. An der Eisoberfläche aber sieht man davon nur das obere Zehntel.



DriftStory 03

Beben und Barrikaden

Die Dicke des Meereises hängt nicht allein davon ab, wie viel Meerwasser im Winter zu Eis gefriert. Entscheidend ist auch, wie häufig das Eis bebt und bricht, sich Schollen übereinander schieben und auftürmen. Warum das passiert und wieso wir mehr über die Hintergründe wissen müssen, erläutern die AWI-Meereisexperten Luisa von Albedyll und Stefan Hendricks im Interview.

meereisportal.de: *Frau von Albedyll, Herr Hendricks: Sie beide untersuchen im Rahmen der MOSAiC-Expedition, wie sich die Dicke des arktischen Meereises im Laufe des Jahres verändert. Warum ist diese Größe für unser Wissen über die Arktis so entscheidend?*

Stefan Hendricks: In der aktuellen Klimadebatte wird uns häufig die Frage gestellt, zu welchem Zeitpunkt die arktische Meereisdecke im Sommer erstmals so umfassend schmelzen wird, dass wir von einem eisfreien Arktischen Ozean sprechen können. Solche Vorhersagen zu treffen ist bislang schwierig, weil wir noch viel zu wenig über die tatsächliche Dicke des Eises wissen. Von ihr aber hängt maßgeblich ab, ob Teile der Meer eisdecke den Sommer überleben werden oder nicht, denn bekanntlich braucht dickes Eis deutlich mehr Zeit, um zu schmelzen als dünneres Eis.

Luisa von Albedyll: Die Eisdicke kann durch zwei Prozesse zunehmen: Zum einen natürlich durch die Abkühlung und das Gefrieren des Meerwassers an der Eisunterseite, was so lange funktioniert, wie die Lufttemperatur kalt genug ist und die Eisdecke nicht zu dick wird, als dass sie eine weitere Auskühlung des Wassers verhindert. Je nach Höhe der Schneedecke auf dem Meereis kann das in der Arktis vielerorts schon bei einer Eisdicke von drei Metern der Fall sein. Der zweite Prozess verläuft deutlich schneller, denn hierbei geht es um Bewegungen und Verformungen des Eises, welche durch Wind und Wellen hervorgerufen werden. Das Eis schiebt sich infolgedessen zusammen und türmt sich zu sogenannten Presseisrücken auf, was dazu führt, dass die Eisdecke an vielen Stellen zwischen 10 bis 20 Meter dick ist.

meereisportal.de: *Dabei heißt es doch, das Meereis der Arktis wird immer dünner ...*

Luisa von Albedyll: Das stimmt. Gleichzeitig wird das Eis aber auch immer schneller und beweglicher. Das bedeutet, Bewegungen und Verformungen des Eises werden für die Gesamtdicke der Meereisdecke immer entscheidender. Vielerorts machen sie mittlerweile 50 Prozent der Eisdicke aus. In unseren Klimamodellen aber sind diese Prozesse noch nicht



Zwei Forscher bergen ein Stromkabel, welches verschüttet worden war, nachdem sich ein Presseisrücken aufgetürmt hatte.

so gut verankert, weshalb wir im Zuge von MOSAiC jetzt das Ziel verfolgen, die Deformationsprozesse besser zu verstehen und die Klimamodelle entsprechend anzupassen.

meereisportal.de: *Wie genau beobachten Sie, wie schnell sich das Eis bewegt und in welchem Ausmaß es sich verformt?*

Luisa von Albedyll: Wir kombinieren eine Vielzahl ganz unterschiedlicher Messungen. Zum Beispiel analysiere ich Meereisaufnahmen des Sentinel-1-Satelliten. Das ist ein radargestützter Satellit, der im Mikrowellenbereich misst und Aufnahmen mit einer Auflösung von 50 Metern erzeugt. Das heißt, wann immer der Satellit über das MOSAiC-Zielgebiet fliegt, erhalten wir auch eine sehr gute Aufnahme. Meine Aufgabe lautet nun, herauszufinden, inwiefern sich das Eis zwischen zwei Aufnahmezeitpunkten bewegt hat. Dafür verwende ich einen Algorithmus, der Bild 1 und Bild 2 miteinander vergleicht, in beiden Aufnahmen nach ein und demselben Muster sucht und auf Basis dessen dann berechnet, wie weit sich dieses Muster in irgendeine Richtung bewegt hat. So erhalte ich dann die Driftgeschwindigkeit des Eises und konnte unter anderem mitverfolgen, wie sich FS Polarstern durch die zentrale Arktis bewegt hat. Die Koordinaten des Schiffes sind eine großartige Referenz, mit deren Hilfe ich jederzeit überprüfen kann, ob mein Algorithmus auch richtig gerechnet hat. Außerdem nutze ich die Daten des schiffseigenen Eisradars, welches mir in hoher Auflösung verrät, wie sich das Eis in einem Umkreis von fünf Kilometern bewegt.

meereisportal.de: *Verrät Ihr Algorithmus auch etwas über Eisverformungen?*

Luisa von Albedyll: Ja, wenn ich die Bewegung benachbarter Eisschollen vergleiche, sehe ich, wo sich das Eis zusammenschiebt, wo es auseinanderdriftet, wo Schollen sich aneinander vorbeischieben und wo nichts dergleichen passiert. Interessanterweise ist das Eis in den Zonen, in denen Meereis deformiert wird, oft relativ eben und dünn. Das heißt, wann immer Meereis zusammengedrückt wird, verformt es sich nicht wie ein weicher Schwamm als ganzer Block, sondern reagiert eher wie Holz, das man zu stark beansprucht hat. Das heißt, es bricht und alle Kraft entlädt sich an einer Stelle oder entlang einer Kante; meist dort, wo das Eis am dünnsten ist. Anschließend schiebt es sich übereinander, türmt sich auf und bildet einen Presseisrücken.

Stefan Hendricks: In einem solchen Moment laufen starke Erschütterungen durch die Eisdecke. Auf dem Eis kann man das noch in einiger Entfernung hören. Unsere russischen Kooperationspartner haben deshalb seismische Messgeräte auf der MOSAiC-Scholle ausgelegt, um solche Deformationsereignisse und die dazugehörigen Eisbeben zu detektieren. Außerdem haben wir sogenannte Stress-Bojen im Eis verankert. Diese messen den Druck im Eis. Ergänzt werden diese Datenerhebungen durch regelmäßige Eisdickenmessungen, welche wir seit Beginn der Expedition jede Woche zu Fuß durchführen, den Messschlitten immer im Schlepptau. Dafür haben wir gleich am Anfang zwei Rundkurse auf der Scholle abgesteckt – einen auf dem etwas dickeren Teil der Scholle; den zweiten



DR. STEFAN HENDRICKS

forscht als Meereisphysiker am Alfred-Wegener-Institut. Er hat sich auf die Messung der Meereisdicke mit Hilfe von Satelliten spezialisiert, nimmt aber auch regelmäßig an Schiffs- und Flugzeugexpeditionen in die Arktis teil.



Im ebenen ungestörten Teil einer Eisscholle ist das Vermessen der Eisdicke eine vermeintlich einfache Aufgabe: Ein Forscher geht voran und misst die Schneedicke mit der Magna-Probe; ein zweiter folgt und zieht den Messschlitten.

auf dem dünnen Eis, welches den Sommer 2019 gerade so überlebt hatte. Bis in den November hinein verliefen beide Strecken über glattes, ebenes Eis. Als dann jedoch Mitte November 2019 ein Sturm über uns hinwegzog, bildete sich im dünneren Teil ein Riss im Eis. Die Schollenteile bewegten sich hin und her und schoben sich am Ende enorm zusammen. Was vorher eine ebene, glatte Eisfläche war, glich nun einem Trümmerfeld.

meereisportal.de: **Haben Sie die Eisdickenmessungen daraufhin einstellen müssen?**

Stefan Hendricks: Nein, im Gegenteil. Dieses Deformationsereignis war für uns ausgesprochen interessant. Als wir das Eis wieder betreten durften, sind wir über die Presseis-Barrikaden geklettert, haben den Kurs der alten Messstrecke wieder neu abgesteckt und mit den Messungen an Ort und Stelle weitergemacht. Immerhin bot sich uns die großartige Chance, genau zu dokumentieren, wie sich die Gesamteisdicke verändert, wenn sich eine ebene Eisfläche in ein solches Trümmerfeld verwandelt.

Luisa von Albedyll: Wenn es im Frühjahr wieder heller wird, werden wir die Eisdicke auch wieder vom Bordhubschrauber aus vermessen können. Bei diesen Messungen kommen

dann unser Meereisdickensensor EM-Bird und ein Laserscanner zum Einsatz. Letzterer erstellt uns ein hochaufgelöstes Höhenmodell der Eisoberfläche. Wir erhalten quasi eine sehr genaue 3D-Karte der Eisoberfläche, welche wir dann mit den Satellitendaten und allen anderen Daten zusammenführen können. Genau das ist ja das Großartige an MOSAiC – wir haben die Chance, alles zu messen, was wir wissen müssen, um in der Frage „Wie verändern Eisverformungen die Eisdicke?“, einen großen Schritt voranzukommen.

meereisportal.de: **Was können Sie denn jetzt schon sagen: Wie bewegt sich das Eis während seiner Reise durch die zentrale Arktis?**

Luisa von Albedyll: Ein großer Teil des arktischen Meereises entsteht in den sibirischen Randmeeren, von wo es der Wind dann auf die offene See hinauschiebt. Anschließend treibt das Eis in der sogenannten Transpolardrift über den Nordpol Richtung Grönland. Innerhalb dieser großen Hauptströmung bewegt sich das Eis aber nicht überall gleich schnell, sondern es wandert in großen Komplexen, von denen jeder ein anderes Tempo haben kann. Diese Eisflächen oder Schollenverbünde können Tausende Quadratkilometer groß sein. An ihren Rändern kommt es immer wieder zu Zusammenstößen, zu Scherbebewegungen oder zu einem Auseinanderdriften, weil sich ein Komplex eventuell schneller

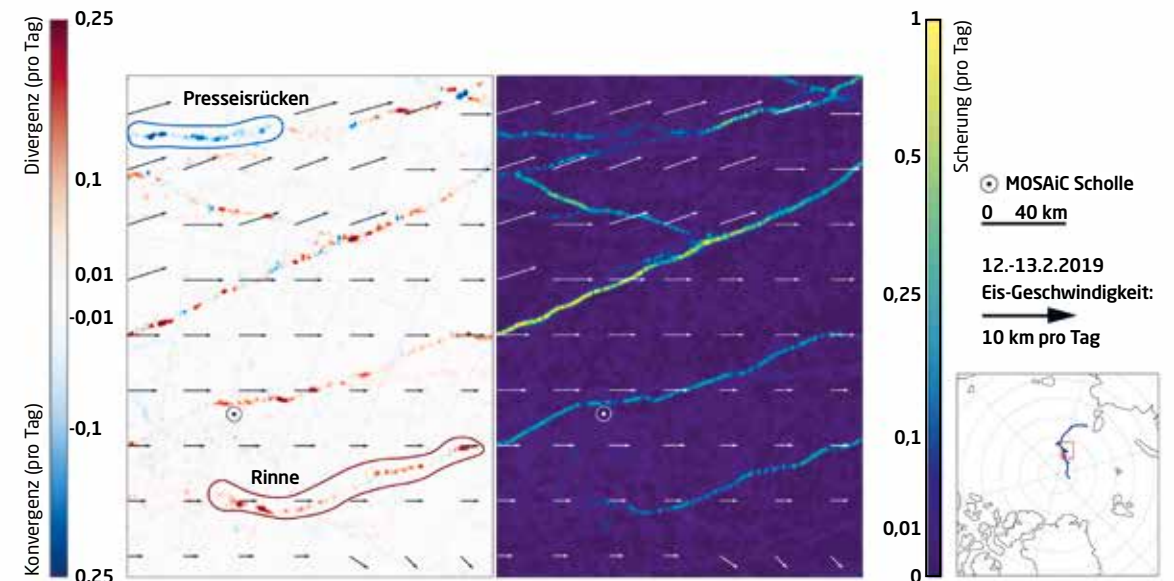
Wo das Eis ächzt und kracht

Umweltphysikerin Luisa von Albedyll nutzt einen Algorithmus, um in Satellitenaufnahmen der Meereisfläche sogenannte Deformationszonen zu lokalisieren. Dabei entstehen solche farbigen Linien. Wo diese rötlich gefärbt sind, ist das Eis auseinandergedriftet; in blauen Bereichen hat es sich zusammengeschoben.



LUISA VON ALBEDYLL

ist Umweltphysikerin und promoviert derzeit an der Universität Bremen zum Thema: Meereisdeformation und Eisdickenänderung. Die erste Hälfte der MOSAiC-Expedition verfolgte sie vom Schreibtisch in Bremerhaven. Anfang April 2020 aber hieß es dann auch für sie: Expeditionssachen packen!





oder aber langsamer bewegt als die Eisflächen in seiner unmittelbaren Umgebung. Es entstehen also sogenannte Deformations- oder Verwerfungszonen, wie wir Wissenschaftler sagen. Die Schollenansammlungen sind zudem nicht starr. Sie können sich im Laufe der Zeit verändern, etwa indem sich Schollen neu anordnen und sich an anderen Stellen Schwachstellen im Eis ergeben. Unter diesen Umständen kann es dann auch passieren, dass eine große Verwerfungszone genau durch die MOSAiC-Scholle läuft, so wie wir es sowohl im November 2019 als auch im März 2020 erlebt haben.

[meereisportal.de](#): **Aber, wenn das Eis in ziemlich engen Verbunden treibt, wie viel Spielraum hat es dann überhaupt, um auseinanderzudriften? Wie muss man sich das vorstellen?**

Luisa von Albedyll: Das ist immer ein Geben und Nehmen. Wenn das Eis an einer Stelle wegdriftet, wird es sich an anderer Stelle auftürmen müssen. Das heißt, wenn sich irgendwo eine Rinne gebildet hat, ist irgendwo anders ein Presseisrücken entstanden. Die Antwort auf die Frage, wo genau sich das Eis aufgetürmt hat, hängt davon ab, wo die Eisdecke am schwächsten gewesen ist. Dort, wo das Eis merklich dünner ist, wird es in der Regel durch das umgebende Eis zusammengeschoben.



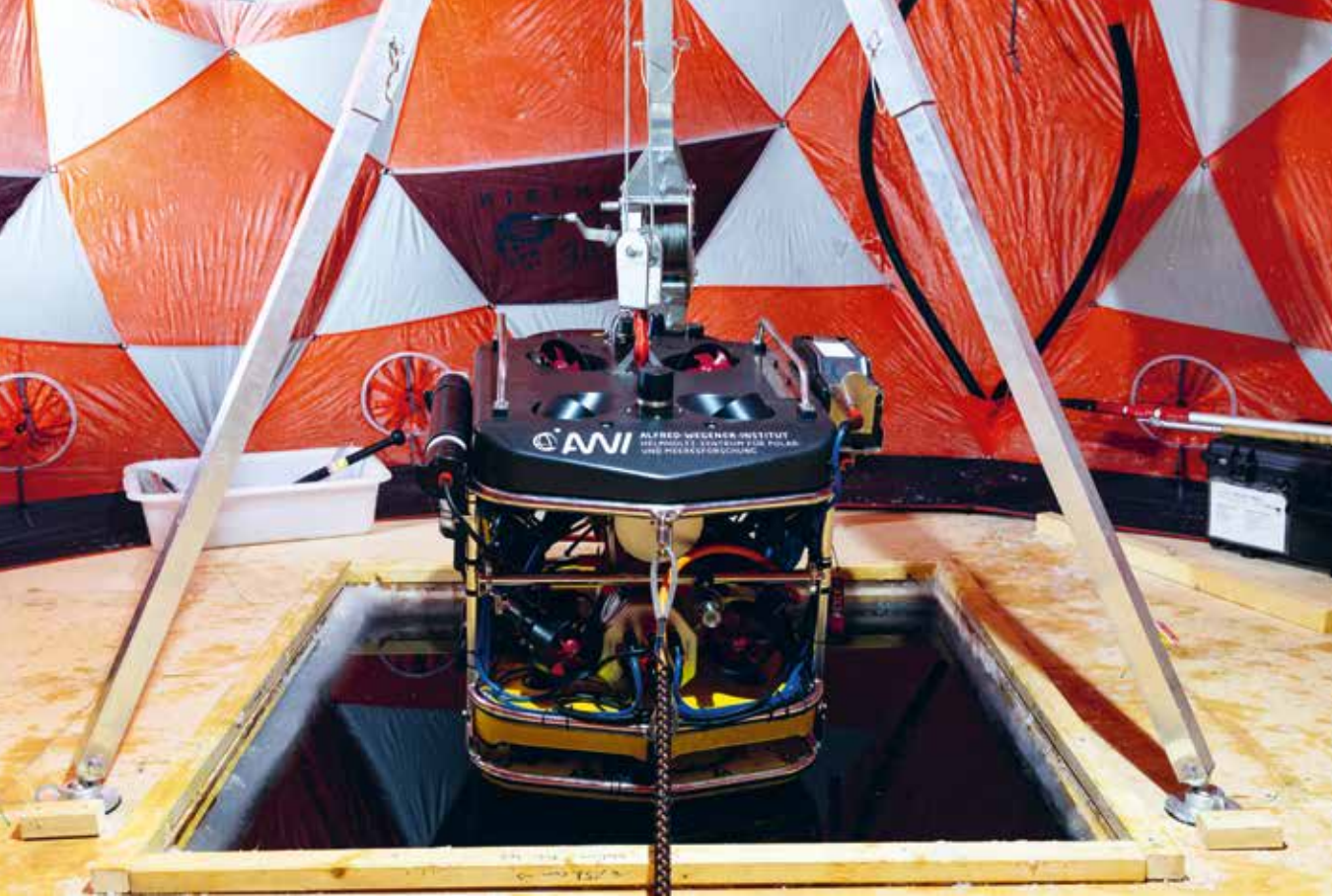
Im März 2020 bildeten sich im näheren Umfeld des Forschungsschiffes Polarstern zwei deutlich sichtbare Rinnen im Eis. Ihr Entstehen war nicht vorherzusehen und stellte die Expeditionsteilnehmenden vor so manche logistische Herausforderung, wie das linke Bild zeigt. Für diese wurden dann gemeinsam Lösungen gesucht und auch gefunden.

[meereisportal.de](#): **Wie sieht denn Ihr erstes MOSAiC-Zwischenfazit aus: Überrascht Sie die Dynamik des arktischen Meereises?**

Stefan Hendricks: Ich muss gestehen, dass das Eis bisher wesentlich dynamischer ist als ich mir das vorgestellt hatte. Abgesehen von den Teilnehmenden der russischen Eisdriftstationen hat ja noch niemand zuvor in der zentralen Arktis überwintert und solche Beobachtungen und Messungen vorgenommen. Ich war zum Beispiel im Vorfeld der MOSAiC-Expedition davon ausgegangen, dass wir am Anfang einige Risse im Eis haben werden, die dann zufrieren und dann war es das. Die Realität aber sah anders aus. Selbst im Wintermonat März bildeten sich wieder Risse im Eis.

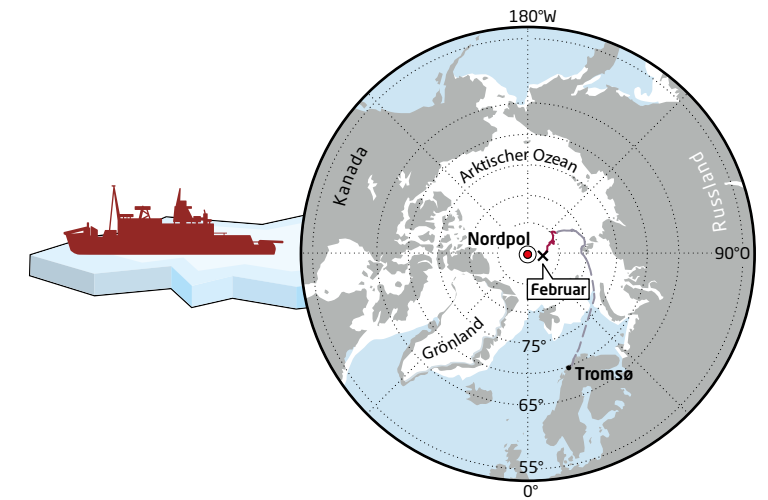
Luisa von Albedyll: Mich persönlich überrascht die Häufigkeit und Stärke von Eisverformungen, wie wir sie jetzt erleben. Vielleicht sind beides schon Indizien für grundlegende Veränderungen in der zentralen Arktis. Das Meereis war ja von Anfang an auch dünner als erwartet. Es kann aber auch sein, dass der Winter nur ausgesprochen stürmisch war. Die entsprechenden Analysen sind noch nicht abgeschlossen. Fest steht aber, dass wir bisher sehr viele Deformationsereignisse beobachten konnten, was für meine Forschungsfrage natürlich hervorragend war. Die Kollegen auf dem Schiff dürften sich weniger gefreut haben. Für sie bedeuteten solche Ereignisse häufig Mehrarbeit, zum Beispiel, weil sie dann die Messgeräte an einen neuen Standort umziehen müssen.

[meereisportal.de](#): **Vielen Dank für das Gespräch. ■**



Pitch: 22.5
Roll: 0.0
22.02.2020
Heading: 289.7
09:25
Depth

Mit dem AWI-Tauchroboter BEAST (o.) erkundeten die Forscher die Meeresunterseite und entdeckten dort Wolken (u.) aus dünnen, bis zu 15 Zentimeter langen Eiskristallen, dem sogenannten Plättcheneis.



DriftStory 04

Glitzernde Wolken unter dem Eis

In welchen Schritten das arktische Meereis wächst und dicker wird, wurde schon in Lehrbüchern erklärt als AWI-Meereisphysiker Christian Katlein noch die Uni besuchte. Während der MOSAiC-Expedition macht der 34-jährige dennoch eine Neuentdeckung: Als er mit dem AWI-Tauchroboter unter der MOSAiC-Scholle auf Erkundungstour geht, fällt ihm ein Phänomen auf, welches Polarforscher bislang nur aus der Antarktis kannten.

Das Dickenwachstum des arktischen Meereises ist im Grunde ganz einfach zu erklären. Man nehme einen Ozean, lege eine junge, dünne Meereisdecke darauf und lasse nun unter Ausschluss der Sonne (Polarnacht) einen eiskalten Wind wochenlang über Meer und Eis fegen. Wenn man möchte, kann man diese Kühlung an jedem neuen Wintertag ein kleines Stückchen weiter herunterregeln – so, wie es die Natur im zurückliegenden MOSAiC-Winter auch getan hat. Zum Ende des Winters 2019/20 zeigten die Thermometer eine Lufttemperatur von minus 39 Grad Celsius an.

Unter derart extremen Bedingungen gibt der Ozean trotz seines Deckels aus Eis relativ viel Wärme an die Luft ab. Diese wandert von der obersten Wasserschicht durch das Eis

hindurch und entweicht an der Eisoberfläche in die Atmosphäre. Gleichzeitig kühlt das salzige Meerwasser an der Eisunterseite so weit aus, dass es seinen Gefrierpunkt von minus 1,8 Grad Celsius erreicht. Neue Eiskristalle entstehen und die Eisdecke wächst von unten – allerdings nicht vollkommen gleichmäßig.

„Das Interessante am Meereis ist, dass es nicht ganzheitlich durchfriert wie das Eis auf einem See oder Teich“, erklärt AWI-Meereisphysiker Dr. Christian Katlein. „Stattdessen sammelt sich das im Meerwasser enthaltene Salz in Form von Salzlake in kleinen Linsen oder Kanälen zwischen den Eiskristallen. Ein großer Teil dieser Sole sickert ins Meer, der Rest aber verbleibt im Eis und führt dazu, dass das Meereis lamellenartig nach unten wächst. Schaut man sich die Eisunterseite aus der Nähe an, erkennt man Reihen von Eiskristallen und zwischendrin sind diese Soleschichten eingelagert.“

DER SPION UNTER DEM EIS

Genau hinzusehen und das Wachsen der MOSAiC-Eisscholle einen Winter lang über eine möglichst große Fläche zu dokumentieren, war eine der Hauptaufgaben, die Christian



Der AWI-Tauchroboter ist kein Leichtgewicht, sodass es der Muskelkraft zweier Forscher bedarf, ihn durch ein Einstiegsloch hindurch ins Wasser zu hieven. Ein Zelt, welches über dem Loch errichtet wurde, schützt die Meereisphysiker vor Wind und Schnee.

Katlein und sein Team auf dem zweiten Fahrtabschnitt der Arktis-Expedition erfüllten. Im Gegensatz zu allen anderen Meereiskollegen an Bord Polarsterns aber untersuchten sie das Eis nicht von der Oberfläche aus oder via Satellit aus dem All, sondern wagten den Perspektivwechsel, indem sie mit dem AWI-Tauchroboter BEAST einen Hightech-Spion unter das Eis schickten – direkt ins Geschehen hinein; dorthin, wo sich ununterbrochen Wasser in Eiskristalle verwandelte.

BEAST ist ein ferngesteuerter Tauchroboter (Remotely Operated underwater Vehicle, ROV) und im Prinzip vergleichbar mit einer quaderförmigen Flunder. Alle Eissensoren und -messinstrumente sitzen auf seiner Oberseite und sind nach oben ausgerichtet. Unterwasserkameras garantieren Sicht in Fahrt- und Gegenrichtung und über ein 300 Meter langes Glasfaserkabel kann Pilot Christian Katlein das etwa 130 Kilogramm schwere Gerät per Joystick steuern und gleichzeitig alle Daten direkt in den Pilotenstand auf dem Eis holen. Dabei handelt es sich um eine kleine Leichtmetallhütte, in welcher das Steuerpult steht und die das ROV-Team aufwendig gedämmt hat, um während der langen BEAST-Tauchfahrten nicht völlig auszukühlen.

Eines der wichtigsten Geräte auf dem BEAST ist das sogenannte Fächerecholot. Mit ihm tastet der Roboter auf einem Streifen von etwa 25 bis 30 Meter Breite die gesamte Eisunterseite ab, erfasst dabei jede Unebenheit und ermittelt den Eistiefgang, von dem sich mit ziemlicher hoher Genauigkeit auf die Eisdicke schließen lässt. Für die wöchentlichen MOSAiC-Eisdickenmessungen im ROV-Messfeld steuert Christian Katlein das BEAST in 20 Metern Tauchtiefe in etwa so, als würde er den Rasen in einem Fußballstadion mähen. Vom Startpunkt aus, dem ROV-Zelt mit dem Einstiegsloch, geht es zunächst mit einer Geschwindigkeit von einem Knoten (etwa 1,85 km/h) im Autopilotenmodus immer geradeaus bis zum Rand des kreisrunden Messfeldes. Dort heißt es dann „Autopilot aus“, im Bogen wenden, „Autopilot wieder ein“ und auf geradem Wege zurück bis zum nächsten Wendepunkt. Streifen für Streifen, insgesamt sechs bis sieben Stunden lang.

„Das Ergebnis dieser Messungen ist eine komplette, räumlich hoch aufgelöste Karte der Eisdicke, welche unsere Dickenmessungen auf dem Eis hervorragend ergänzt und sehr gut veranschaulicht, wie das Eis in der Fläche dicker wird“, sagt Christian Katlein. Im MOSAiC-Winter legte das Eis wöchentlich sechs bis acht Zentimeter zu. War der jüngere, dünne Teil der MOSAiC-Scholle im Oktober 2019 noch 20 bis 30 Zentimeter dick, dokumentierte das BEAST dort Anfang März 2020 rund 130 Zentimeter Eisdicke; im Bereich des älteren, mehrjährigen Eises waren es sogar zwei Meter.

ÜBERRASCHUNG AM SILVESTERTAG

Wie entscheidend der Blick von unten auf das arktische Meereis sein kann, erfährt Christian Katlein am Silvestertag. Als sich das BEAST bei einer Erkundungstauchfahrt langsam der Eisfläche von unten nähert, erkennt er auf seinem Steuermonitor plötzlich Ansammlungen filigraner Eisplättchen, die wie Cirruswolken unter dem Eis hängen und im Scheinwerferlicht des Roboters glitzern. Christian Katlein erinnert der Anblick im ersten Moment an das Funkeln eines verschneiten Winterwaldes. „Plättcheneis kannten wir bis zu diesem Tag nur aus der Antarktis. Es jetzt auch in größeren Mengen im Winter unter



DR. CHRISTIAN KATLEIN

forscht als Meereisphysiker am Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung und hat den AWI-Tauchroboter BEAST federführend mitentwickelt. Christian Katlein war von Mitte Dezember 2019 bis Anfang März 2020 an Bord des Forschungsschiffes Polarstern.

der MOSAiC-Scholle zu finden, hat uns wirklich überrascht“, erzählt der Physiker. Eine anschließende Literaturrecherche ergibt, dass bislang so gut wie kein anderer Polarforscher Plättcheneis in der Arktis entdeckt, es gründlich untersucht und darüber in einem Fachbuch oder -magazin berichtet hat. Die wenigen Hinweise, die sich dazu bisher finden lassen, haben eher anekdotischen Charakter.

Aus diesem Grund beginnen Christian Katlein und sein Kollege, AWI-Ozeanograph Dr. Benjamin Rabe, das Phänomen genauer zu untersuchen. Eine erste Spur entdecken sie in den Temperaturofzeichnungen der Ozean-Messbojen, die im Umfeld der MOSAiC-Eisscholle ausgebracht sind. Sie alle zeigen an, dass die Wassersäule während des kalten Winters in den oberen fünf Metern unterkühlt ist. Das heißt, ihre Temperatur liegt etwa 0,01 Grad Celsius unter dem eigentlichen Gefrierpunkt des Meerwassers. Warum aber gefriert dieses Wasser dann nicht?

„Das arktische Meerwasser ist so ruhig und vor allem so sauber, dass es kaum Kristallisationskeime wie Staubpartikel, Algen oder andere winzige Störungen enthält. Diese aber werden benötigt, damit sich Eiskristalle bilden können“, erklärt Christian Katlein. Erst, wenn das unterkühlte Wasser an der Meereisunterseite mit Kristallisationskeimen zusammentrifft, entstehen die oft plättchenförmigen Eiskristalle. Denselben Effekt beobachten die Wissenschaftler auch, wenn sie Seile oder metallene Messstangen von der Eisoberfläche aus in das superkalte Wasser tauchen. Innerhalb kurzer Zeit sind Seil oder Stange von Eiskristallen überzogen.

Angespornt von der Entdeckung unter der MOSAiC-Scholle weiten die Forscher nun ihre Temperaturanalysen auf ozeanographische Messreihen außerhalb des Expeditionsumfelds aus. Abermals werden sie fündig, abermals gibt es Hinweise auf ein sogenanntes



Die Meereisphysiker sind auf der MOSAiC-Expedition nicht die Einzigen, die Eisbohrkerne ziehen. Hier bohren Biogeochemiker ein Loch in einen frisch gewonnenen Kern, um dessen Temperatur zu messen.



Das Plättcheneis der Arktis unterscheidet sich klar von jenem der Antarktis: Es bildet zum einen keine meterdicken Schichten; zum anderen entsteht es im superkalten Wasser an der Meereisunterseite - und nicht in großer Tiefe unter Schelfeisen.

Super-Cooling des von Meereis bedeckten Oberflächenwassers. „Der Temperaturunterschied ist jedoch so gering, dass er bislang vermutlich als Messfehler abgetan wurde und noch niemand dem Ganzen genauer nachgegangen ist“, sagt Christian Katlein. „Wir konnten jetzt aber zeigen, dass es bei uns definitiv kein Messfehler war. Herauszufinden, dass im Winter in großen Teilen der Arktis ein Prozess stattfindet, der in dieser Form noch niemandem aufgefallen war, ist die größte Überraschung dabei.“

In der Antarktis bildet sich das Plättcheneis unter den **Schelfeisen**, wird von aufsteigenden Wassermassen mitgerissen und sammelt sich schließlich in fünf bis zehn Meter dicken Schichten unter dem Meereis. Da ein Teil der filigranen Plättchen irgendwann an der Meereisunterseite festwächst, können Wissenschaftler bei Kristalluntersuchungen des antarktischen Meereises das Plättcheneis später auch in der Meereisstruktur wiedererkennen. In den Eisproben von der MOSAiC-Scholle aber suchen Christian Katlein und Kollegen vergeblich nach eingefrorenen Spuren der Plättchen. Selbst eine Untersuchung im Labor an Bord Polarsterns liefert keine brauchbaren Spuren.

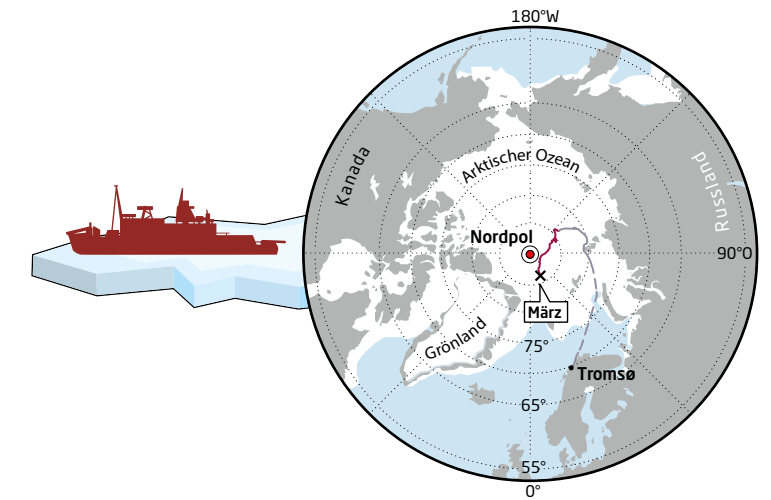
„Vermutlich liegt es daran, dass sich die Voraussetzungen der Plättcheneisbildung in der Arktis und Antarktis deutlich voneinander unterscheiden“, sagt Christian Katlein. In der Arktis bilden sich die Eisplättchen in der unterkühlten Wasserschicht direkt unter dem Meereis und wachsen direkt an dessen Unterseite und nicht im freien Wasser. Im Gegenzug sind die arktischen Plättcheneiswolken nur 10 bis 20 Zentimeter dick. „Und da das normale Meereis im Winter sehr schnell wächst, gehen wir davon aus, dass es auch mit hohem Tempo durch die Plättcheneisschicht hindurchwächst und die einzelnen Plättchen dabei gewissermaßen verschlingt“, erklärt der Meereisphysiker.

Einen weiteren Beweis für die Existenz der außergewöhnlichen Eiskristallwolken aber braucht das AWI-Team auch gar nicht. Das BEAST hat den „glitzernden Winterwald“ unter dem Meereis der Arktis gefilmt und sogar den Kristallen bei ihrer Entstehung zugeschaut. Christian Katlein und Kollegen arbeiten jetzt an einem Fachartikel, in dem sie über ihre Beobachtungen und Untersuchungsergebnisse berichten werden. Die Meereis-Lehrbücher, so scheint es, werden demnächst überarbeitet werden müssen. ■

Als Schelfeis bezeichnet man den auf dem Meer schwimmenden Fortsatz eines Eisschildes oder Gletschers - also jenen Teil, der nicht mehr auf dem Land oder dem Meeresboden aufliegt. Solche Eiszungen können zwischen 50 und 1500 Meter dick sein.



Premiere in der Arktis: Raupenführer Hannes Laubach hat schon häufig die Landepiste an der deutschen Antarktis-Forschungsstation Neumayer III plantiert. Schneeräumfahrten auf arktischem Meereis aber waren auch für ihn eine neue Aufgabe.



DriftStory 05

Ein heißer Streifen Eis

Wie dick muss Meereis sein, damit ein Flugzeug darauf landen kann? Diese und andere Fragen stellten sich AWI-Meereisforscher Christian Haas und sein Team, als sie bei völliger Dunkelheit anfangen, eine Landebahn auf der MOSAiC-Eisscholle zu präparieren. Sie meisterten die Aufgabe, lernten dabei aber auch, dass der Bau einer Rollbahn auf dem Eis eine ganz eigene Meereis-Wissenschaft ist.

AWI-Geophysiker und Meereisexperte Prof. Christian Haas ist in seinem Forscherleben schon oft mit Flugzeugen auf dem arktischen Meereis gelandet: Zum Beispiel nördlich von Ellesmere Island (Kanada) an Bord des AWI-Forschungsflugzeuges Polar 5 und mit Twin Otter-Maschinen auf Ski; oder aber als Passagier einer russischen Antonow-Frachtmaschine, die ein Eiscamp in der Nähe des Nordpols versorgte. Dass ihm diese persönlichen Reiseerlebnisse eines Tages jedoch helfen würden, als erster deutscher Polarforscher selbst den Bau einer Landebahn auf dem Arktischen Ozean zu leiten, hatte sich der 53-jährige bis zum Start der MOSAiC-Expedition nicht träumen lassen. Außergewöhnliche Expeditionen aber verlangen außergewöhnliche Leistungen! Und so standen Fahrtleiter Christian Haas, Polarstern-Kapitän Stefan Schwarze und Logistik-Mitarbeiter Hannes Laubach am Anfang des zweiten Expeditionsabschnittes vor der Herausforderung, bei

anhaltender Dunkelheit eine zunächst einmal 400 Meter lange und 25 Meter breite Start- und Landebahn auf der MOSAiC-Scholle zu errichten.

Gebraucht wurde diese kurzfristig für Sicherheitsbelange. FS Polarstern befand sich zu diesem Zeitpunkt mehr als 1000 Kilometer entfernt von der nächsten menschlichen Siedlung. Wäre es im Laufe der Expedition zu einem medizinischen Notfall gekommen, wäre Rettung aus der Luft die einzige Option gewesen. Kanadische Twin Otter-Maschinen hätten den oder die Patienten dann ausfliegen können.

Langfristig sah der Plan vor, die Bahn vor allem für Logistikzwecke zu nutzen. So sollten die AWI-Forschungsflugzeuge während ihrer MOSAiC-Frühlingsmesskampagne am Schiff zwischenlanden, um aufzutanken. Auf diese Weise wären sie in der Lage gewesen, deutlich weiter in die zentrale Arktis vorzudringen als ohne Zwischenstopp. Für April 2020 war zudem ein Mannschaftswechsel per Flugzeug geplant. Eine russische Antonow-Maschine sollte neue Wissenschaftler zum Schiff bringen und die Winter-Crew zurück mit an Land nehmen. Dafür wollte man die Landepiste sogar auf 1000 Meter verlängern. Die Corona-Pandemie hat all diese Pläne zunichtegemacht, doch das konnten Christian Haas und seine Kollegen im Dezember 2019 noch nicht ahnen. Sie legten los und stellten sich zunächst einmal viele Fragen.



Das Werk ist vollbracht! Teilnehmende des zweiten MOSAiC-Expeditionsabschnittes begutachten die frisch präparierte Landebahn - so gut dies bei Dunkelheit eben geht.

ERSTE FRAGE:

Wie dick muss das Eis sein, damit ein Flugzeug überhaupt darauf landen kann?

Eine Antwort darauf fanden die Bauherren in Fachliteratur zur Biegesteifigkeit und Bruchfestigkeit von Meereis. „Aus den Gleichungen und Formeln ging hervor, dass die Eisfläche für die sichere Landung einer 2,6 Tonnen schweren Twin Otter mindestens 80 Zentimeter dick sein muss - ein Grenzwert, den die MOSAiC-Scholle gegen Ende Dezember bereits an vielen Stellen erreicht hatte“, erzählt Christian Haas.

Viel mehr Kopfzerbrechen bereitete ihm und seinen Kollegen aber der Umstand, dass Meereis an sich nicht spiegelglatt ist, sondern eine raue Oberfläche besitzt. „Es ist von Presseisrücken und Schneewehen durchsetzt, sodass man nicht so ohne Weiteres eine ausreichend große, ebene Fläche findet, auf der man sicher mit einem Flugzeug landen könnte“, so der Wissenschaftler. Solche Hindernisse und den Schnee würde das Team deshalb mit der bordeigenen Pistenraupe beseitigen müssen. Nur wusste zu diesem Zeitpunkt niemand, wie hoch ein Presseisrücken sein darf, damit ihn die Raupe auch glattschieben kann. Es würde auf den Versuch ankommen.

Zuerst einmal aber musste ein passendes Landeareal gefunden werden. Dafür setzte das Pistenteam auf Eisdicken- und Oberflächendaten, welche die Bord-Hubschrauber auf speziellen Polarnacht-Flügen mit einem Laser-Scanner sammelten. Um bei Dunkelheit aufsteigen zu dürfen, hatten die Hubschrauberpiloten im Vorfeld der Expedition spezielle Trainingseinheiten durchlaufen und die Helikopter jede Menge neuer Technik mit an Bord. Ein kostspieliger Einsatz, der sich aber sofort auszahlte. Auf den sehr detailreichen Eiskarten fanden die Wissenschaftler zwei geeignete Areale. Eines lag quasi direkt neben dem Schiff; ein zweites in etwa zwei Kilometer Entfernung.

„Wir haben uns für die schiffsnahe Eisfläche entschieden, obwohl sie aus ganz jungem Eis bestand, welches sich erst wenige Wochen zuvor gebildet hatte. Sie war dennoch überall dick genug und brachte mehrere Vorteile mit sich“, erzählt der Fahrtleiter. Zum einen vermied das Team mit einer schiffsnahen Landebahn viele lange und aufwendige Fahrten über das Eis. Zum anderen konnten alle Räum- und Planierarbeiten zumindest halbwegs im Scheinwerferlicht des FS Polarstern durchgeführt werden. In größerer Entfernung wäre es stockfinster gewesen und jede Bewegung auf dem Eis entsprechend riskanter.

ZWEITE FRAGE:

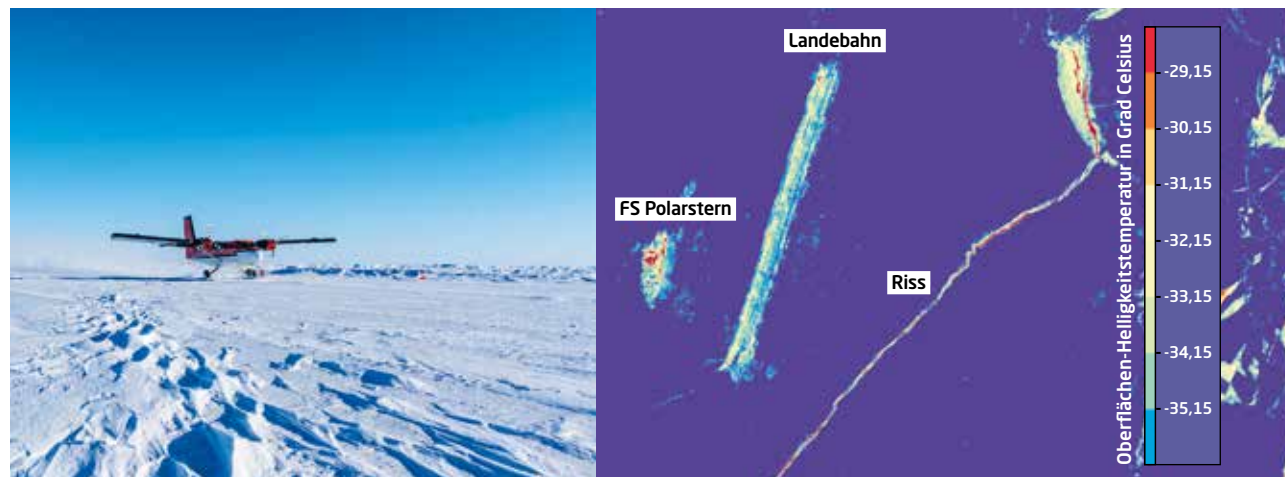
Wieviel Durchschlagskraft hat die Pistenraupe?

Als nächstes stellte sich die Frage nach der 16 Tonnen schweren Pistenraupe. Würde das Meereis ihrem Gewicht standhalten? „Solange sich das Fahrzeug bewegt, biegt sich das Eis darunter nur leicht durch. Problematisch wird es jedoch, wenn sie für mehrere Stunden oder Tage an einer Stelle steht“, so Christian Haas. In diesem Fall würde das Gefährt langsam einsinken, weil sich das Eis unter ihm verbiegt. Irgendwann entstünden dann Risse im Eis, die zur Folge hätten, dass die Raupe letztendlich einbrechen würde. Aus diesem Grund wurde das Gefährt nach jedem Arbeitseinsatz an einer anderen Stelle geparkt. Ihre erste Kraftprobe absolvierte die Pistenraupe noch bevor sie die künftige Landebahn



PROF. DR. CHRISTIAN HAAS

leitet die Sektion Meereisphysik am Alfred-Wegener-Institut in Bremerhaven und koordinierte als wissenschaftlicher Fahrtleiter die Forschungsarbeiten auf dem zweiten Teilabschnitt der MOSAiC-Expedition (Dezember 2019 - März 2020).



Auf der Wärmebild-Luftaufnahme (r.) ist die Rollbahn als „heißer“ Streifen zu erkennen. Die anderen hellen Flächen sind Risse im Eis, Regionen mit dünnerem Eis und das FS Polarstern. Wegen der Corona-Pandemie konnten hier nur einmal Flugzeuge landen (l.).

überhaupt erreicht hatte. Auf dem Weg vom Schiff dorthin versperrten nämlich riesige Presseisrücken den Weg. Das heißt, die Raupe musste sich ihren Weg erst einmal freiräumen. Die Leichtigkeit, mit der das gelang, überraschte Fahrleiter und Logistiker: „Einen ein Meter hohen Presseisrücken schob die Raupe mit roher Gewalt mühelos zur Seite“, berichtet Christian Haas. Den Ausschlag dafür gab das Alter des Eises. „Die Presseisrücken bestanden aus jungem Eis. Das heißt, die Rücken auf der Meeroberfläche wurden im Grunde durch lose aufgetürmte Eisblöcke gebildet, die zu unserem Glück noch nicht fest miteinander verfroren waren“, so der Meereisexperte. Hätten diese Rücken bereits einen Sommer überstanden, wären die Eisblöcke zu einer kompakten Masse verschmolzen, die nicht so leicht nachgegeben hätte.

DRITTE FRAGE:

Wie kitten wir Risse in der Landebahn?

Während sich die Raupe den Weg zur Landebahn freischob, steckten die Wissenschaftler eine schnurgerade Linie für die künftige Landebahn mit Flaggen ab. Das war angesichts der Dunkelheit nicht einfach. Mithilfe von Positionslichtern, die wie Leuchttürme zur Orientierung dienten, stellte das Team sicher, dass die „Gerade“ diese Bezeichnung am Ende auch verdiente. Das Freiräumen der Landebahn gelang im Anschluss innerhalb eines Tages - Aufgabe erledigt, oder etwa nicht?

„Im Februar entdeckten wir die ersten Risse in der Bahn. Und sofort stellte sich die Frage, wie wir diese wieder schließen könnten, wie nah eine Pistenraupe überhaupt an einen solchen Riss heranzufahren kann, ohne einzubrechen und wie breit er maximal sein darf, damit ihn die Raupe auch noch reparieren kann“, erzählt Christian Haas.

Das Eis war bis dahin schon mehr als einen Meter dick. Das reichte vollends, um mit der Raupe bis zur Eiskante heranzufahren. Die zu schließende Lücke im Eis durfte laut Regelwerk nicht größer sein als ein Drittel der Raupenkettlänge - also in etwa zwei bis drei Meter. Und stopfen konnten die Wissenschaftler den Riss mit Schnee und Eisblöcken. „Der Vorteil von Schnee ist, dass er so kalt ist wie die Luft und damit auch deutlich kälter als das Eis. Schiebt man Schnee in einen Riss und verdichtet ihn, gefriert die Masse sofort zementhart und der Riss ist geflickt. Im Grunde war es also ganz einfach, denn Schnee hatten wir genug“, berichtet der Fahrleiter.

Zu diesem Zeitpunkt hatten die Forscher bei Hubschrauberflügen über die MOSAiC-Scholle bereits eine interessante Entdeckung gemacht. Auf Wärmebild-Aufnahmen der Scholle erkannte man die schneefreie Landebahn eindeutig als „heißen Streifen“. Was war der Grund? Christian Haas: „Die schneebedeckten Eisflächen wurden durch den Schnee so gut isoliert, dass kaum Wärme aus dem Meer in die Atmosphäre entweichen konnte. Auf der Landebahn aber fehlte diese Isolationsschicht.“

Aus diesem Grund wächst das Eis unter der Landebahn (schneefrei - keine isolierende Wirkung, Wärmeverlust des Meeres, Gefrieren) auch deutlich schneller als die Eisflächen neben der Piste (schneebedeckt - isolierende Wirkung des Schnees, weniger Wärmeverlust, weniger Gefrieren).

VIERTE FRAGE:

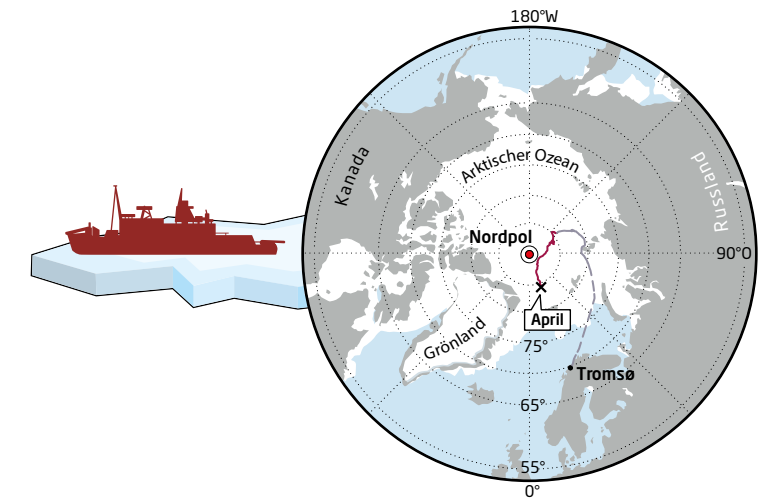
Wohin mit dem vielen Schnee?

Angespornt vom eigenen Erfolg, beschloss das Team, die auf **Twin Otter-Maschinen** zugeschnittene Landebahn im Februar 2020 auf Antonow-Maße (1000 Meter Länge, 60 Meter Breite) zu erweitern. Wohin aber mit dem vielen Schnee? An den Pistenrändern türmten sich bereits einen Meter hohe Wälle auf - und sie wurden wie von Zauberhand immer breiter. „Auf dem Meereis stellt jede Erhebung ein Hindernis dar, hinter dem sich sofort neuer Triebsschnee ansammelt. Daher darf man den Schnee eigentlich nicht auf türmen, sondern muss ihn breitflächig verteilen“, gibt Christian Haas zu bedenken. Hinzukommt das Gewicht der Schneemassen: „Schiebt man den Schnee auf einen Haufen, konzentriert sich sein Gewicht auf eine Stelle und drückt das Meereis nach unten. Das wiederum kann dazu führen, dass das Eis bricht und reißt oder aber es zu Überflutungen kommt, wenn die Eisfläche durch die Schneelast unter den Wasserspiegel gedrückt wird und Meerwasser durch den Porenraum oder aber durch die Risse aufsteigt.“ Im Gegensatz dazu fehlt der Schnee dort als Auflastschicht, wo er entfernt wurde. Die schneefreie Eisfläche hebt sich deshalb etwas an, was zu weiteren Rissen und weniger Stabilität führen kann.

Der Bau einer Landebahn auf dem arktischen Meereis ist demzufolge eine Wissenschaft für sich und deutlich komplexer als man denken könnte. Für Christian Haas war es rückblickend eines der spannendsten Meereis-Projekte im MOSAiC-Eiscamp, selbst wenn er die tatsächliche Landung zweier Twin Otter Maschinen im April 2020 nicht mehr live vor Ort verfolgen konnte. Zu diesem Zeitpunkt hatte bereits das dritte Expeditionsteam das Kommando in der zentralen Arktis übernommen - und Christian Haas war - wie die meisten AWI-Mitarbeiter zu dieser Zeit - wegen Corona im Home-Office. ■

Weil der Ausbruch der Corona-Pandemie alle Pläne zum Austausch der Schiffsbesatzung auf den Kopf gestellt hat, landeten am 22. April 2020 anstelle der ursprünglich geplanten Antonow-Maschinen zwei kanadische Twin Otter-Flugzeuge im MOSAiC-Eiscamp, die Forschende ausflogen. Die Propellermaschinen gelten als unverwundliche Allesflieger und werden regelmäßig für Flüge in Polarregionen eingesetzt.

In der zentralen Arktis schneit es vergleichsweise selten. Dafür wird der gefallene Schnee vielfach verweht. Meist sammelt er sich dann hinter Hindernissen wie Presseisrücken an.



DriftStory 06

Schnee, die unbekannte Größe

Die Wintertage, an denen es in der zentralen Arktis schneit, lassen sich an einer Hand abzählen. Dennoch entscheidet die Schneemenge auf dem Meereis maßgeblich darüber, wie schnell das Eis wächst und wann es im Frühling schmilzt. Viel aber weiß man bisher nicht über die weiße Pracht. Für MOSAiC haben AWI-Meereisphysiker daher ein einzigartiges Schnee-Forschungsprogramm initiiert.

Frisch gefallener Schnee ist ein Wunderwerk der Natur. Kein anderer Naturstoff auf der Erde reflektiert einfallendes Licht in so großen Mengen wie er. Keine andere natürliche Auflage isoliert so gut gegen Kälte wie eine Decke aus Abermilliarden winziger Schneekristalle. Trägt die Arktis ihr schneeweißes Winterkleid, strahlt dieses bis zu 90 Prozent des einfallenden Sonnenlichtes zurück in das Weltall und verhindert mit diesem sogenannten Albedo-Effekt eine Erwärmung der Polarregion. Gleichzeitig schützt die Schneedecke an Land Pflanzen und Tiere vor dem Erfrieren. Während die bodennahe Luft im arktischen Winter unter Umständen auf bis zu minus 40 Grad Celsius abkühlen kann, bleibt es unter der Schneedecke erträglich mild. Die Temperatur dort beträgt – je nachdem, wie hoch



sich der Schnee aufgetürmt hat - bis zu null Grad Celsius. Ein Unterschied, der Kleintieren wie Hermelinen das Überleben sichert.

Betrachtet man Schnee allerdings aus der Perspektive eines Meereisforschers, wirft die weiße Auflage in erster Linie Fragen auf. Bislang weiß nämlich niemand genau, wie viel Schnee über dem Arktischen Ozean überhaupt fällt und wie viel davon wo auf dem Meereis liegen bleibt. Dabei entscheidet der Schnee maßgeblich über das Schicksal des Meereises. Im Winter hindert die isolierende Auflage das Eis daran, in einem größeren Maße auszukühlen und noch schneller zu wachsen. Im Frühling wiederum reflektiert sie das einfallende Sonnenlicht und zögert auf diese Weise die Schmelze des Meereises hinaus - allerdings nur so lange, bis der Schnee selbst schmilzt. Sammelt sich sein Schmelzwasser auf dem Eis entstehen Pfützen, sogenannte Schmelzwassertümpel. Sie wiederum nehmen Sonnenwärme auf, erwärmen sich und treiben die Meereisschmelze voran. Eis und Schnee stehen demzufolge in einer ausgesprochen komplexen und wechselhaften Beziehung zueinander.

Inwiefern jedoch Schneemengen und -höhen in diesem Wechselspiel einen Unterschied machen und welche physikalischen und chemischen Prozesse über das Jahr hinweg in der Schneedecke ablaufen, ist bislang noch wissenschaftliches Neuland. Die AWI-Meereisphysiker haben das Thema Schnee deshalb ganz bewusst in den Mittelpunkt ihrer



Forscher haben einen SnowMicroPen auf dem Schnee platziert (l.), um sein Dichteprofil zu erstellen. Dazu sticht der Messstab senkrecht in den Schnee und misst mit einem Sensor an seiner Spitze den Widerstand. Bei Sturm fragen sich alle: Schneit es wirklich oder wirbelt der Wind nur lose Kristalle umher (o.).



DR. STEFANIE ARNDT

arbeitet als Meereisphysikerin am Alfred-Wegener-Institut in Bremerhaven und untersucht seit Jahren die Rolle des Schnees in den Polarregionen. Ihre Forschung führte sie in der Vergangenheit vor allem in die Antarktis. Für MOSAiC aber reiste die 31-jährige nun auch mal wieder in den hohen Norden.

MOSAIC-Forschungsarbeiten gerückt und ein breitgefächertes Messprogramm entwickelt, mit dem sie die Meereisaufgabe seit Oktober 2019 täglich bis wöchentlich auf allen zeitlichen und räumlichen Skalen untersuchen.

Diese Feldarbeit ist Grundlagenforschung pur - angefangen bei winzigen Schneekristallen und ihrer Metamorphose zum Schneekorn; über die Entstehung verschiedener Schneeschichten, deren Dichte, Mikrostruktur, Wärmeleitfähigkeit, Temperatur, Wasser- und Salzgehalt; bis hin zur Verteilung des Schnees auf der gesamten MOSAiC-Eisscholle und darüber hinaus. Entstanden ist so einer der wertvollsten MOSAiC-Datensätze, dessen erste Zwischenergebnisse bereits aufhorchen lassen. Dabei schneit es in der nördlichen Polarregion deutlich seltener, als man es vielleicht erwarten würde. Modellberechnungen zufolge fallen in der zentralen Arktis pro Monat zwischen 10 bis 40 Liter Niederschlag pro Quadratmeter Meereis, mehr als 60 Prozent davon in Form von Schnee. Das heißt, im Monatsmittel fällt in der Nordpolregion in etwa genauso viel Niederschlag wie in der Sahara-Wüste.

VOM WINDE VERWEHT

„Die Tage, an denen wir auf unserem Expeditionsabschnitt Schneefall wirklich bewusst wahrgenommen haben, können wir an einer Hand abzählen“, erzählt AWI-Meereisphysikerin Dr. Stefanie Arndt, die das Schneeprogramm auf dem dritten MOSAiC-Fahrtabschnitt (März-Mai) geleitet hatte. Wenn nämlich Flocken durch die Luft wirbelten, wehte meist



**DR. MARCEL
NICOLAUS**

leitet das arktische Schneebojen-Programm der AWI-Meereisphysik. Auf seinen vielen Expeditionsreisen in die Arktis und Antarktis untersucht er vor allem die Wärme-, Licht- und Energieflüsse durch das Meereis und seine Schneeauflage.

auch ein starker Wind. „Wir konnten in diesen Momenten kaum erkennen, ob tatsächlich Neuschnee fiel oder aber der Wind bereits gefallene Schneekristalle wieder aufgewirbelt hatte und sie neu auf der Eisscholle verteilte“, so Stefanie Arndt.

Die Wissenschaftlerin zog daher am Ende ihres Aufenthaltes im MOSAiC-Eiscamp daselbe Zwischenfazit wie auf den Fahrtabschnitten zuvor bereits ihre AWI-Kollegen Daniela Krampe und Dr. Marcel Nicolaus: Für den lokalen Schneezuwachs auf dem arktischen Meereis scheinen Schneeverwehungen eine viel wichtigere Rolle zu spielen als die Niederschlagsmenge insgesamt. „Aufgrund des starken Windes bleibt der frisch gefallene Schnee nicht einfach liegen. Er wird verfrachtet und lagert sich in großen Mengen an Unebenheiten auf der Eisoberfläche ab, so zum Beispiel im Windschatten der aufgetürmten Presseisrücken“, berichtet Daniela Krampe.

Bestätigt wird diese wiederholte Beobachtung der AWI-Forscher durch Messreihen der 14 Schneebojen, die ein AWI-Team zum Auftakt der MOSAiC-Expedition auf ebenem Eis installiert hatte. Während die Schneedecke auf dem ebenen Eis nur langsam zunahm und zum Ende des Winters nicht einmal an die 30 Zentimeter-Marke heranreichte, versanken die Forscher hinter den Eisbarrieren alsbald hüfttief im Schnee.

„Die Umverteilung des Schnees einen ganzen Winter lang zu beobachten und zentimetergenau zu vermessen, war für uns eine einmalige Gelegenheit“, berichtet AWI-Meereisphysiker Marcel Nicolaus. Er hatte vor MOSAiC schon häufig an Polarstern-Expeditionen in die Arktis teilgenommen. Auf diesen Sommerreisen aber erreichte das Schiff die zentrale



Die Schneedünen im Windschatten der Presseisrücken sind die einzigen Stellen auf der Eisscholle, an denen die Wissenschaftler auch mal hüfttief im Schnee versinken. Überall sonst ist die Schneedecke zum Ende des Winters nicht einmal 30 Zentimeter tief.

Arktis meist erst gegen Ende Mai oder Anfang Juni. „Die vom Wind angehäuften Schneemassen waren zu diesem Zeitpunkt schon wieder zu einem großen Teil geschmolzen, sodass wir keine Vorstellung davon hatten, welches Ausmaß die winterlichen Schneeverwehungen tatsächlich annehmen“, erzählt der 44-Jährige.

NEUE KOMPONENTE FÜR MEEREIS-MODELLE

Die vielen neuen Daten zur Schneehöhe und -umverteilung werden jetzt ausgewertet. Anschließend stehen die AWI-Forscher vor der Aufgabe, ihr neues Wissen in bestehende Eismodelle einzubauen. „In unseren Modellen ist der Schnee bislang zumeist gleichmäßig über alle Eisflächen verteilt. Das bedeutet, ihnen fehlt eine ganz wesentliche Komponente, die wir benötigen, um die Energieflüsse und -bilanzen richtig zu berechnen und somit auch die zukünftige Entwicklung des arktischen Meereises besser vorherzusagen“, sagt Marcel Nicolaus. Er selbst hatte bereits vor Jahren in einer Studie untersucht, welchen Unterschied der Schnee in der Energiebilanz des Meereis-Ozean-Systems machen kann. Dabei kam heraus: Schmilzt die Schneedecke nur 14 Tage früher im Jahr, schmilzt auch das Meereis so schnell, dass der Ozean den Sommer über bis zu 50 Prozent mehr Sonnenenergie aufnimmt, als wäre der Schnee später geschmolzen. Ein echtes Aha-Erlebnis, weshalb die AWI-Meereisforscher auch die Frühlingssschmelze des Schnees gespannt verfolgten. Aufgrund der Corona-bedingten Unterbrechung des MOSAiC-Eiscamps klappte dies von



Aller Schnee schmilzt im Sommer. Sein Schmelzwasser bildet dann Tümpel auf dem Eis, deren dunkle Wasseroberfläche Sonnenlicht nur mäßig reflektiert. Stattdessen absorbiert sie die Strahlung: Das Wasser erwärmt sich und beschleunigt die Eisschmelze.

REKLIM

Helmholtz-Verbund
Regionale Klimaänderungen

 ALFRED WEGENER-INSTITUT
HELMHOLTZ-ZENTRUM FÜR POLAR-
UND MEERESFORSCHUNG



**TECHNIK-
CONTAINER**

HELMHOLTZ

SPITZENFORSCHUNG FÜR
GROSSE HERAUSFORDERUNGEN

HIER ÖFFNEN!

Methodenvielfalt

Mehr geht wirklich nicht

Auf der MOSAiC-Expedition kam so gut wie jedes bekannte Meereis-Messgerät zum Einsatz - bewährte Technik ebenso wie Neuentwicklungen. Die wichtigsten Instrumente stellen wir hier kurz vor, sortiert nach Standort oder Perspektive. Die Forschenden haben nämlich keine Möglichkeit unversucht gelassen, das Meereis aus wirklich jedem Winkel zu untersuchen.

MESSUNGEN AUS LUFT UND WELTALL



Für weiträumige Messungen der Eisdicke kommt ein Forschungsflugzeug zum Einsatz. Es schleppt den Eisdicken-Sensor EM-Bird in 15 Metern Höhe über das Eis.



Eisdickensensor EM-Bird

Flugzeug Polar 6



Sentinel-2



CryoSat-2

Satelliten

Im All kreisen mittlerweile mehr als 20 Satelliten zur Meereisbeobachtung; die meisten in einer Höhe von 600 bis 800 Kilometern. Zwei der wichtigsten sind CryoSat-2 (Eisdicke) und Sentinel-2 (Struktur der Eisoberfläche).



Quadrokopter

Aus der Vogelperspektive hat man den besten Überblick: Daher lassen die Forscher Drohnen (Quadrokopter) für Fotos und Messungen der Oberflächeneigenschaften aufsteigen.



Hyperspektralkamera
Laserscanner
EM-Bird
Strahlungsmessgerät

Hubschrauber

Mit Nachtflug-Technik ausgerüstet, darf der Hubschrauber an Bord des Eisbrechers Polarstern auch bei Dunkelheit abheben und wird für verschiedene Eismessungen eingesetzt.

MESSUNGEN AUF UND IM EIS



Fernkundungsmessfeld

Um zu überprüfen, wie genau Satelliten das Meereis vermessen, haben die Forscher zehn Instrumente mit vergleichbaren Sensoren auf dem Eis aufgebaut.



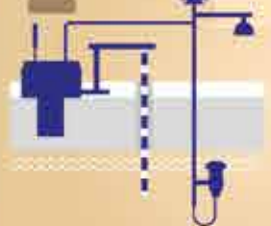
Thermistorkettenboje

Eine fünf Meter lange Kette mit Temperatursensoren reicht von der Schollenoberfläche bis in das Meer und misst die Temperatur von Schnee, Eis und Wasser.



Fluss-Messschlitten

Wie viel Wärme gibt der Ozean durch das Eis an die Luft ab? Um diese Frage zu beantworten, messen die Forscher mit Fluss-Stationen und -Schlitten die Energieflüsse.



Meereis-Massenbilanzboje

Diese Boje kombiniert Schneehöhen-, Eisdicken- und Temperaturmessungen und überwacht so, wie die Schnee- und Eisdecke wachsen und schrumpfen.



Panoramakamera
Eisradar
Eislabor-Container mit vielen Messgeräten

Forschungsschiff Polarstern

Die Zentrale: An Bord des Forschungsschiffes Polarstern steht der Eislabor-Container mit dem Mikro-Computertomographen und vielen anderen Spezialgeräten.



Eisdickensensor im Schlitten

Für Eisdickenmessungen auf der Eisscholle wird der elektromagnetische Sensor in einem Schlitten über das Eis gezogen - meist auf abgesteckten Strecken.



Eiskernbohrer

Ob Biologen, Physiker oder Chemiker: Nahezu alle Forscher an Bord brauchen Eiskerne für ihre Untersuchungen. Gezogen werden diese mit einem Eiskernbohrer.

Geräte zur Messung mechanischer Eigenschaften des Meereises



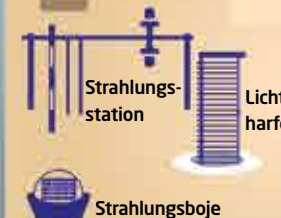
Stress- oder Drucksensoren

Seismometer und Neigungssensoren



Laser-Dehnungsmesser

Druckmessung der Eisstärke, -festigkeit und Stabilität



Strahlungsstation

Licht-harfe

Strahlungsboje

Lichtmessungen

Eisschollen, die sich zusammenschieben, können enorme Kraft entwickeln und haben schon so manches Schiff zerquetscht. Um zu verstehen, was Eis kann und welche Spannungen wirken, setzen die Forscher folgende Messgeräte ein.



Messstangen und Heizdrähte

Stangen und Heizdrähte werden zur punktuellen Messung der Eisdicke eingesetzt. Der Unterschied: Die Stangen frieren fest, während sich die Drähte nach dem Aufheizen bewegen lassen.



Schneeschacht

Im Schneeschacht wird die Schneeschicht vermessen und beprobt. Dafür benötigt man u. a.: Schaufel, Spachtel, Zollstock, Probendosen und ein Klippboard für die Notizen.



MagnaProbe

Mit der MagnaProbe messen Forscher die Schneehöhe. Sie stechen dazu mit der Stange von oben in den Schnee; Position und Messdaten werden auf Knopfdruck gespeichert.



SnowMicroPen

Mit dem SnowMicroPen erstellt man ein Dichteprofil der Schneedecke. Der Stab sticht dabei senkrecht in den Schnee und misst mit einem Sensor an seiner Spitze den Widerstand.

MESSGERÄTE FÜR SCHNEE



Terrestrischer Laserscanner

Der Laserscanner vermisst die Oberfläche der Meereisfläche und erstellt ein genaues Höhenprofil. So lassen sich u. a. Schneeverwehungen detektieren.



Doppler-Strömungsmesser

Ein akustischer Doppler-Strömungsmesser (ADCP) nutzt Schallwellen, um die Fließgeschwindigkeit von Wassermassen zu messen.



AWI-Tauchroboter BEAST

Kameras
Sonare
Strahlungsmesser
CTD-Sonde
Sauerstoffmesser

Der Tauchroboter BEAST wird über ein Kabel ferngesteuert und kann für seine Tauchgänge unter das Eis mit ganz unterschiedlichen Sensoren ausgestattet werden.



Mikrostruktur-Messsonde

Diese Sonde ist auf Verwirbelungen spezialisiert. Sie vermisst die turbulente Durchmischung des Wassers in sehr hoher Auflösung.

MESSUNGEN UNTER DEM EIS



CTD-Sonde und Wasserschöpfer

Die CTD-Sonde (Conductivity, Temperature, Depth) misst die elektrische Leitfähigkeit und Temperatur des Wassers in der jeweiligen Tiefe. Mit dem Wasserschöpfer werden Wasserproben genommen.



DANIELA KRAMPE

Daniela Krampe untersucht als Doktorandin den Rußpartikelgehalt von Schnee auf arktischem Meereis und hatte auf dem zweiten MOSAiC-Fahrtabschnitt die einmalige Gelegenheit, Schneeproben aus der unmittelbaren Nordpol-Region zu nehmen.

Mitte Mai bis Mitte Juni allerdings nur per Satellit. Die Schneebojen auf der Eisscholle sendeten jedoch verlässliche Schneedickendaten. Diese verraten unter anderem, dass im Mai vier Tage mit einer Lufttemperatur von weniger als ein Grad Celsius über Null genügten, um die Höhe der Schneeeauflage um die Hälfte schrumpfen zu lassen – von 20 auf 10 Zentimeter. An diesen und den vielen anderen neuen MOSAiC-Schneedaten der AWI-Meereisphysik werden sich Meereis- und Klimamodelle mit einer Schneekomponente künftig messen lassen müssen. Bisher ist es nämlich noch niemandem gelungen, einen ganzen Winter lang und darüber hinaus so konsistente und vor allem verlässliche Daten zum Schnee auf dem arktischen Meereis zu sammeln.

NUR WENIG SCHNEE GEHT IN EISRINNEN VERLOREN

Neu gedacht werden muss nach dem MOSAiC-Winter auch die Antwort auf die Frage, wie viel Schnee verloren geht, wenn sich Risse im Eis bilden oder aber Schollen auseinander-treiben und der Schnee direkt ins Wasser fällt. „Bisher sind wir davon ausgegangen, dass Eisrinnen zum Schneeverlust beitragen. Im MOSAiC-Eiscamp aber konnten wir jetzt unzählige Male beobachten, dass neu gebildete Rinnen aufgrund der eisigen Lufttemperaturen binnen weniger Stunden wieder überfrozen sind“, berichtet Stefanie Arndt. Das heißt, der Schnee verschwand nicht mehr im Meer, sondern sammelte sich nach kurzer Zeit auf dem neuen Eis an, von wo ihn dann der Wind unter Umständen neu verteilt.

TATZENABDRÜCKE IM SCHNEE

Bei ihrer Arbeit auf dem Eis beobachtete Stefanie Arndt zudem noch ein zweites Phänomen: Angesichts der Tatsache, dass in den Wintermonaten vergleichsweise wenig Schnee gefallen ist, führte die stete Schneedrift dazu, dass Spuren im Schnee monatelang erhalten blieben – auch die Fußabdrücke vierbeiniger Besucher. „Auf einer unserer Messstrecken konnten wir sogar noch im April 2020 ganz deutlich die Spuren eines Eisbären erkennen, der vermutlich im Dezember 2019 im MOSAiC-Eiscamp gewesen ist. Seit Januar gab es nämlich während unseres Expeditionsabschnitts keine neuen Eisbärensichtungen“, erzählt die 31-jährige Meereisphysikerin.

Sie und ihre AWI-Meereiskollegen warten jetzt gespannt auf das Ende der Expedition und die Rückkehr Polarsterns nach Bremerhaven. Im Kühlcontainer des Schiffes lagern nämlich schon jetzt unzählige Schneeproben, welche die AWI-Wissenschaftler in regelmäßigen Abständen an verschiedenen Stellen des Eiscamps genommen haben. Die Proben sollen unter anderem Aufschluss darüber geben, wie viele Rußpartikel sich im Schnee abgelagert haben oder aber wie viel Mikroplastik aus der arktischen Luft in den Schnee übergegangen ist. Außerdem sind Untersuchungen der Wasserisotopen geplant.

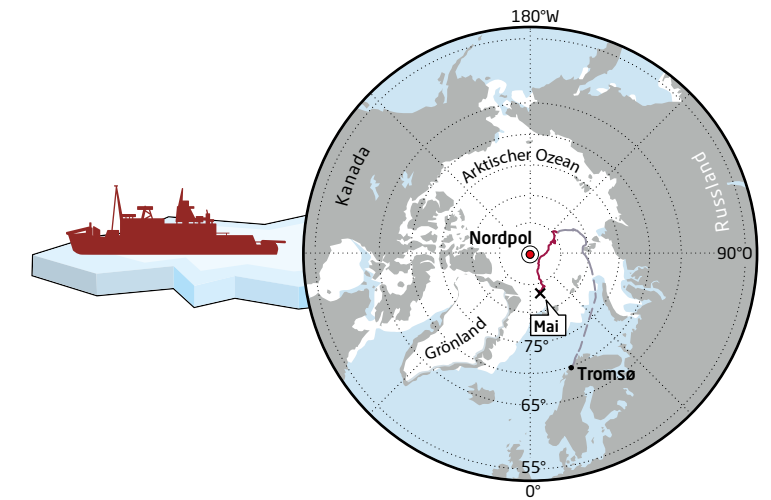
Deren Ergebnisse lassen unter anderem darauf schließen, woher der Niederschlag gekommen ist, bevor er sich als Schnee auf dem arktischen Meereis abgesetzt hat, und wie sich der Schnee selbst im Laufe der Zeit auf dem Eis verändert hat. Außerdem erkennen die Meereisphysiker anhand der Wasserisotopen von Schnee und Eis sehr genau, welcher Anteil des Eises sich ursprünglich aus Schnee gebildet hat und nicht aus Meerwasser. Dazu

muss man wissen, dass die Schneeschicht auf dem Meereis unter Umständen auch so dick werden kann, dass ihr Eigengewicht das Meereis unter die Wasseroberfläche drückt. Dadurch gelangt Wasser auf die Eisscholle und durchnässt den Schnee – etwa, indem es durch Poren oder Risse im Eis emporsteigt. Gefriert dieses Wasser anschließend wieder, bildet sich das sogenannte Schnee-Eis, welches die Eisscholle von oben wachsen lässt. Das Thema Schnee wird die AWI-Meereisforscher also noch weit über die MOSAiC-Zeit hinaus beschäftigen. Die riesige Anzahl des Schneeproben und die Vielzahl der gesammelten Datensätze lassen vermuten, dass sie dabei noch jede Menge Hochinteressantes und Neues entdecken werden. ■



Eisbären näherten sich dem Schiff im Laufe der Expedition immer wieder mal und statteten ihm einen Besuch ab. Wirklich gefährliche Begegnungen zwischen Mensch und Tier aber gab es glücklicherweise nicht.

Schmelzwassertümpel fast so lang wie das Forschungsschiff Polarstern bedecken am 30. Juni 2020 die MOSAiC-Eisscholle. Begonnen aber hatte die Schneeschmelze schon Wochen früher.



DriftStory 07

Das Omen des ersten Schneeballs

Mit der Sonne kehrt auch die Wärme zurück in die Arktis. Wie diese jedoch die Schneeschicht verändert und damit auf das Meereis wirkt, ist bisher noch nicht richtig verstanden. AWI-Forscher haben die Veränderungen des Schnees deshalb mit besonderem Augenmerk verfolgt - und mit einem verblüffend einfachen Trick.

Satelliten, Roboter, Hightech-Kameras: Auf keiner Polarexpedition zuvor wurde das arktische Meereis bislang mit so viel moderner Technik vermessen wie im Rahmen der MOSAiC-Expedition. Dennoch greifen die Meereisphysiker im Eiscamp manchmal auch auf ganz einfache Tricks zurück, um Erkenntnisse zu gewinnen - zum Beispiel auf den kinderleichten Schneeballtest. „Mit dem Versuch, einen Schneeball zu formen, können wir ziemlich gut überprüfen, ob die Schneeschmelze eingesetzt und sich der Flüssigwassergehalt im Schnee erhöht hat. Unter normalen Winterbedingungen ist der Schnee auf dem arktischen Meereis nämlich viel zu kalt und trocken, um ihn zu einer Kugel zu formen“, erklärt AWI-Schneeexpertin Dr. Stefanie Arndt.

Sie führte den Schneeballtest bei ihren Forschungsarbeiten im MOSAiC-Eiscamp deshalb regelmäßig durch. Schließlich war Stefanie Arndt als Teilnehmerin des dritten

Fahrtabschnittes genau zu jenem Zeitpunkt auf der Scholle angekommen, als es in der zentralen Arktis nach der langen Polarnacht zum ersten Mal wieder dämmerte und die Sonne ihre Rückkehr ankündigte. Der Frühling stand vor der Tür und mit ihm die wichtigen Forschungsfragen, ab wann und vor allem auf welche Weise das Sonnenlicht und die steigenden Lufttemperaturen die Schneedecke auf dem arktischen Meereis verändern würden.

Zunächst aber rieselten der Wissenschaftlerin die für den Schneeball gedachten zwei Handvoll Schnee ein jedes Mal durch die Finger - auch als die Sonne in den ersten beiden Aprilwochen schon 24 Stunden pro Tag über dem Horizont stand. „Eine ungestörte, weiße Schneefläche besitzt eine enorm hohe Rückstrahlkraft, die als Albedo bezeichnet wird. Sie reflektiert bis zu 90 Prozent des einfallenden Sonnenlichtes. Wenn zur gleichen Zeit auch die Lufttemperatur unterhalb des Gefrierpunktes liegt, kann die Sonnenenergie den Schnee und das Meereis darunter nicht schmelzen. Das heißt, die physikalischen Eigenschaften des Schnees verändern sich kaum und er pappt auch nicht zusammen“, erzählt Stefanie Arndt.



Juni 2020: Eine Holzplatte dient den Forschern als Brücke über einen Schmelzwasserbach, der zwischen Schiff und Camp verläuft.

EIN VORGESCHMACK AUF DEN FRÜHLING

Der Wendepunkt kommt am 19. April in Form eines kurzen, massiven Wärmeeinstroms in die zentrale Arktis. Innerhalb eines Tages stieg die Lufttemperatur an der Schneeoberfläche im MOSAiC-Eiscamp von minus 7,4 Grad Celsius auf minus 0,2 Grad Celsius. Die Wärme blieb nur für knapp 24 Stunden, doch ihre Kraft reichte aus, um die Schneedecke nachhaltig zu verändern. „Die warme Luft an der Schneeoberfläche sorgte unmittelbar dafür, dass sich auch das obere Drittel der Schneeschicht bis an den Schmelzpunkt erwärmte“, berichtet die Wissenschaftlerin. Im Anschluss gefror die Schneeschicht wieder komplett. Zu diesem Zeitpunkt aber hatte die Wärme längst erste Spuren im Schnee hinterlassen. „Wir gehen davon aus, dass in dieser kurzen Warmphase die ersten der vielen großen Schneekristalle zu schmelzen begannen, sie ihre Form veränderten und kleiner wurden, auch wenn man der gesamten Schneefläche diese Veränderungen im Detail noch nicht ansehen konnte“, sagt Stefanie Arndt.

Mit bloßem Auge zu erkennen ist einzig und allein eine auffällige Glazéschicht, die sich an der Schneeoberfläche gebildet hat. „Der Schnee sah von oben aus, als sei die gesamte Fläche großflächig angeschmolzen. Tatsächlich aber war die Oberfläche nach dem Wärmeeinbruch wieder angefroren und reflektierte nun wie ein Spiegel“, berichtet die Wissenschaftlerin.

Einen solchen Wärmeeinbruch in der zentralen Arktis selbst mitzerleben, ist für Stefanie Arndt und alle anderen Wissenschaftler an Bord Polarsterns das Highlight des Frühlings. Alle Forschergruppen intensivieren ihre Messungen, um die Auswirkungen des

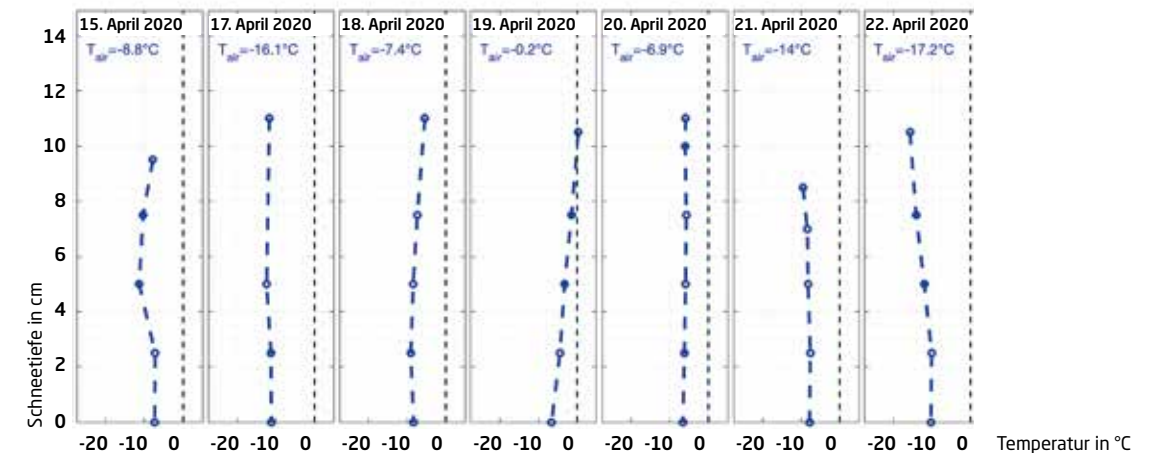


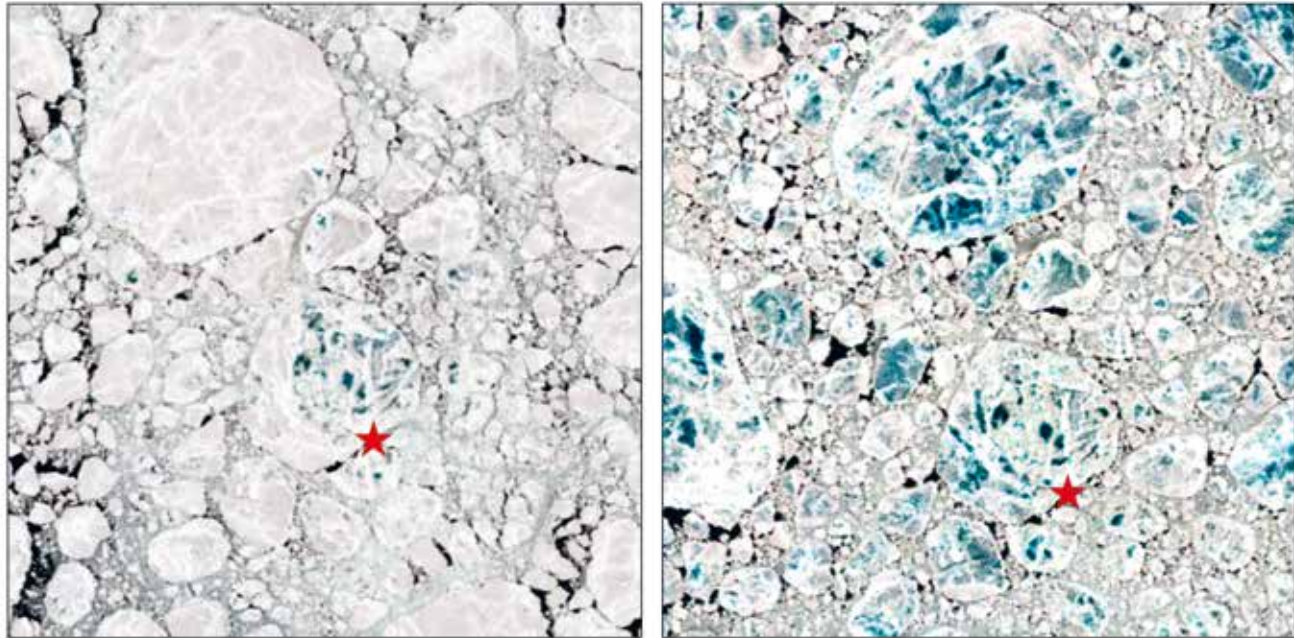
DR. STEFANIE ARNDT

formte im Laufe der MOSAiC-Expedition tatsächlich regelmäßig Schneebälle für Forschungszwecke - sofern die Schneeeigenschaften dies zuließen.

Wenn die Atmosphäre dem Schnee einheizt

Als sich die Luftmassen über der MOSAiC-Scholle vom 18. April auf den 19. April 2020 plötzlich erwärmten, veränderte sich auch das Temperaturprofil der Schneedecke auf dem Eis unmittelbar, wie diese Messdaten belegen. Vor allem die Temperatur im oberen Drittel der Schneeschicht stieg bis dicht an den Schmelzpunkt. Anschließend kühlte der Schnee jedoch genauso schnell wieder aus.





Neun Tage liegen zwischen diesen beiden Satellitenaufnahmen vom Eis rund um die MOSAiC-Scholle (roter Stern). Am 21. Juni 2020 bilden sich die ersten Schmelzwassertümpel (l.); am 30. Juni 2020 bedecken sie große Flächen des Eises (r.).

Ereignisses in allen Sphären zu dokumentieren – von der Atmosphäre bis in den Ozean. Relativ schnell aber wird deutlich: Ein kurzer Wärmeeinbruch allein reicht noch nicht aus, um die Schmelzsaison in der zentralen Arktis in Gang zu setzen. Dazu bedarf es schon eines besonderen Ereignisses, welches sich fast vier Wochen später, am 12. Mai einstellt. An diesem Tag fegt ein Sturmtief vom **Nordkap** kommend mit Windstärke 7 bis 10 durch die zentrale Arktis und tauscht die winterliche Kaltluft im MOSAiC-Eiscamp gegen wärmere Luft aus dem Süden aus. Die Lufttemperatur an der Schneeoberfläche steigt erneut rasch an – von minus 10,9 auf minus 0,2 Grad Celsius. Nur diesmal bleibt die Wärme und vollendet, was sie im April begonnen hat.

DIE EISSCHOLLEN WERDEN GRAU

Frisch gefallene Schneekristalle besitzen eine Vielzahl winziger Flächen und Kanten. An ihnen reflektiert das Sonnenlicht, sodass die Schneedecke für Betrachter weiß erscheint. Erwärmt sich der Schnee aber, lässt die Wärme die vielen Mikrostrukturen der Schneekristalle miteinander verschmelzen. Kanten werden runder, die Kristalle klumpen zusammen. Backschnee entsteht, aus dem sich nun auch Schneebälle formen lassen. „Setzt sich dieser Prozess über zwei bis drei Tage fort, färbt sich die ehemals weiße Schneedecke grau ein, weil sie aufgrund veränderter optischer Eigenschaften nun nicht mehr das gesamte

Das Nordkap ist ein in das Nordpolarmeer hineinragendes Kap auf der Insel Magerøya, die an der äußersten Nordküste Norwegens liegt. Es gilt seit dem Jahr 1999 als der nördlichste vom Festland auf dem Straßenweg erreichbare Punkt Europas.

Spektrum des einfallenden Sonnenlichtes reflektiert. Stattdessen absorbiert sie fortan mehr und mehr Sonnenstrahlung, welche den Schnee weiter erwärmt und seine Schmelze von innen vorantreibt. Er sackt in sich zusammen, wird feuchter und verwandelt sich in grauen Schneematsch, dessen Schmelzwasser in Vertiefungen auf dem Meereis erste Pfützen bildet“, erklärt Stefanie Arndt.

Der Auftakt der Schneeschmelze auf dem Meereis markiert im Frühjahr auch das Ende der AWI-Eisdickenmessungen mithilfe des CryoSat-Satelliten. Ist der Schnee feucht, wird das Radarsignal des Satelliten nicht mehr eindeutig genug zurückgestrahlt. Den Wissenschaftlern fällt es dann schwer, anhand der Messdaten zu erkennen, ob das Signal von einer Schnee-Eisschicht oder aber vom offenen Wasser reflektiert wurde. Daher unterbrechen sie die Messungen für den Sommer.

Stefanie Arndt kann die Anfänge der Schneeschmelze in der dritten und vierten Maiwoche leider nur von Bord Polarsterns aus beobachten. Das Schiff befindet sich, in dieser für die Meereisphysiker so entscheidenden Phase, Corona-bedingt gerade auf dem Weg nach Spitzbergen, um das Wissenschaftler-Team auszutauschen. Als sich das Schiff nach dem Crewwechsel wieder der MOSAiC-Eisscholle nähert, ist es bereits Mitte Juni.

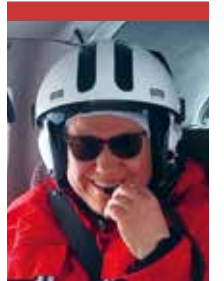
EIN TEPPICH AUS SCHMELZTÜMPELN

Als eine der ersten Teilnehmerinnen des vierten Fahrtabschnittes sieht AWI-Klimaforscherin Dr. Gerit Birnbaum die Scholle. Im Rahmen von Eis-Lasermessungen mit dem Polarstern-Hubschrauber überfliegt sie das Schollen-Ensemble und dokumentiert den Zustand der Eisoberfläche: „Bei unserem ersten Überflug am 16. Juni gab es auf den Eisschollen im Umfeld der MOSAiC-Scholle erste Tümpel hauptsächlich entlang der Presseisrücken. Schmelztümpel in den flacheren, undeformierten Bereichen der Schollen waren noch relativ selten. Stattdessen sahen wir hier regelmäßige graue Muster oder Flächen, die vom schmelzenden Schnee zeugten, während sich die Presseisrücken wie weiße Bänder über die Schollen zogen“, berichtet sie von Bord Polarsterns.

Zwei Wochen später steht auf den Schollen vielerorts Wasser. „Bis Ende Juni nahm dann der Flächenbedeckungsgrad der Tümpel rasch zu; die Schneeschmelze war in vollem Gange. Temperaturbedingt gab es aber mehrere Zyklen von Schmelze und Wiedergefrieren der obersten Wasserschicht in den Tümpeln. Wir konnten also gut neu gebildete, dünne Eisschichten auf ihrer Oberfläche sehen“, erzählt Gerit Birnbaum. Auf dem jungen Eis, welches gerade einen Winter alt war, hatte sich der graue Schneematsch aufgelöst und sein Schmelzwasser einen Flickenteppich aus miteinander verbundenen Pfützen und Tümpeln gebildet. Die Presseisrücken zogen sich weiterhin als hellere Bänder über die Schollen.

Die Veränderungen an der Eisoberseite wirken bis in den Ozean, wie die Strahlungsmessdaten der AWI-Meereisphysiker zeigen. Überall dort, wo Schmelzwassertümpel auf dem Eis entstehen, wird das Sonnenlicht nämlich weniger reflektiert. Es erwärmt das Wasser in den Tümpeln und dringt im zunehmenden Maße durch das dünner werdende Eis in den oberen Ozean, wo es Algen das Startsignal zum Wachsen gibt.

Diese Lichtdurchlässigkeit nimmt erstaunlicher Weise erst dann wieder ab, wenn die Schmelztümpel von oben durch die Eisdecke hindurchschmelzen und ein Großteil ihres



DR. GERIT BIRNBAUM

ist Meteorologin und arbeitet in der Sektion Meereisphysik am Alfred-Wegener-Institut in Bremerhaven. Die Rolle von Schmelztümpeln im Zusammenspiel von Meereis und Atmosphäre ist eines ihrer zentralen Forschungsthemen.

Wassers in den Ozean abläuft. In diesem Moment beginnt die nun nackte und freiliegende Eisfläche an den Rändern des ehemaligen Tümpels, das einfallende Sonnenlicht wieder stärker zu reflektieren, und die **AWI-Strahlungssensoren** unter dem Eis dokumentieren einen deutlichen Rückgang der Lichtintensität – eine wichtige Erkenntnis für die Energiebilanz und Wärme Flüsse im System Meereis-Ozean.

Strahlungssensoren messen die einfallende oder aber reflektierte Lichtmenge und wurden während der MOSAiC-Expedition sowohl auf dem Eis als auch darunter eingesetzt. Die Untereis-Messungen dienten u. a. der Frage, ab wann Algen im und unter dem Eis genügend Licht bekommen, um sich zu vermehren.

AUF DEN QUADRATMETER GENAU

„In den ersten Julitagen sind vor allem große, tiefere Tümpel auf dem zweijährigen Eis ausgelaufen – das heißt, ihre Wasserfläche oder Ausdehnung ist wieder geschrumpft. Auf dem einjährigen Eis ist die Schmelze soweit fortgeschritten, dass in manchen Bereichen der Flächenanteil der blauschimmernden Tümpel grösser ist als die Fläche der verbliebenen Schneematschreste, die sich nur an jenen Stellen gehalten haben, wo sie topografisch etwas höher liegen“, sagt Gerit Birnbaum. In der Fachsprache werden diese letzten Flecken Grauweiß auch „Streuschicht“ genannt, denn als Schnee kann man die Überreste wirklich nicht mehr bezeichnen.

Gerit Birnbaum und ihr Team dokumentieren das Wachsen und Schrumpfen der Schmelztümpel auf den Quadratmeter genau, denn bei den Hubschrauber-Messflügen über das Eis erfassen Kameras die Größe, den Umfang und die Form der einzelnen Tümpel. Außerdem erkennen die Forscher anhand der Kamera-Daten die Größenverteilung der Schmelzwasseransammlungen, ob die Tümpel miteinander verbunden sind und wie tief ein jeder von ihnen ist. Vermessen werden zusätzlich die mittlere Albedo des Meereises und mit einem Laser-Scanner die Topografie seiner Oberfläche.



Das Werk der Wärme: Die grauen Schneeflächen verraten den Forschern, in welchen Bereichen der Eisscholle die Schneedecke zu schmelzen begonnen hat. Diese Luftaufnahme stammt vom 24. Mai 2020.

Zu wissen, wie früh im Jahr sich die ersten Schmelztümpel bilden, wie groß sie werden und wann sie auslaufen, ist entscheidend, wenn es um die Frage geht, wann die Arktis im Sommer vermutlich das erste Mal eisfrei sein wird. Als dunkle, sonnenlichtabsorbierende Fläche trägt das Netz aus Schmelzwassertümpeln nämlich maßgeblich dazu bei, dass das arktische Meereis im Sommer schneller und großflächiger schmilzt als in der Vergangenheit.

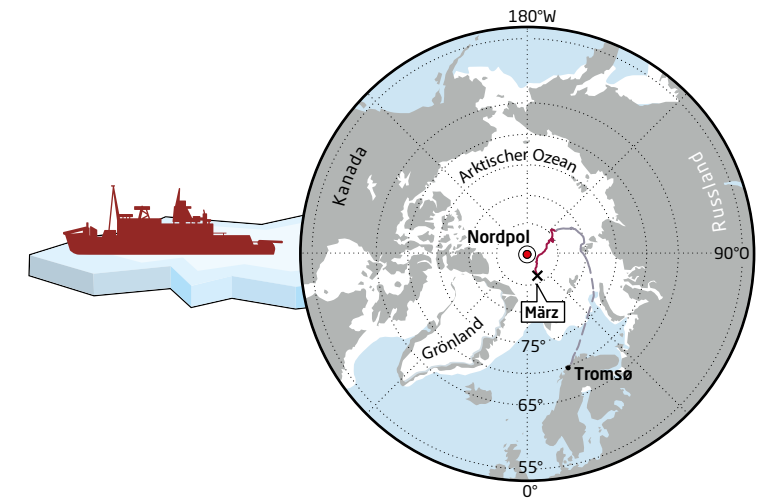
Aus diesem Grund laufen Gerit Birnbaums MOSAiC-Schmelztümpel-Messdaten auch in einer Vielzahl wissenschaftlicher Analysen ein. So untersuchen Wissenschaftler, ob die Tümpel auf der MOSAiC-Eisscholle und in ihrem erweiterten Umfeld repräsentativ sind für das Meereis in der zentralen Arktis. Andere wiederum kontrollieren mithilfe der Hubschraubermessungen, inwiefern verschiedene satellitengestützte Messinstrumente die arktischen Schmelztümpel passgenau erfassen.

Eines dieser Systeme ist MODIS, das Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer an Bord der US-amerikanischen Terra- und Aqua-Satelliten. Dessen Daten wollen AWI-Meereisphysiker im MOSAiC-Sommer nutzen, um das Schmelzen der gesamten arktischen Meereisdecke bis in das kleinste Detail nachzuverfolgen. Dazu dokumentieren sie mithilfe des Satellitensystems, wann wo tatsächlich Meereis vorhanden war, in welchen Bereichen es von Schmelztümpeln bedeckt wurde und wo sich offene Wasserflächen gebildet hatten. Gerit Birnbaums zahllose Hubschrauber-Messflüge über die langsam schmelzende MOSAiC-Eisscholle werden sich am Ende also auf vielfache Weise auszahlen. ■



Gut acht Wochen später, am 29. Juli 2020, bauen die Wissenschaftler ihr Forschungscamp ab. Die Scholle steht zu großen Teilen unter Wasser und zerbricht einen Tag später in viele Einzelteile.

Diesen orangefarbenen Fesselballon nennen die Wissenschaftler „Miss Piggy“. Er steigt an einem Seil befestigt bis in eine Höhe von zwei Kilometer auf und wurde eingesetzt, um die Temperatur der unteren Luftschichten zu erfassen.



DriftStory 08

Die vielen Gesichter der Kälte

Auf die Frage: „Wie kalt wird es in der Arktis?“ antworten Polarforschende durchaus unterschiedlich - je nachdem, ob sie eher die **Atmosphäre, Schnee** und **Meereis** oder aber den **Ozean** darunter untersuchen. Im Rahmen der MOSAiC-Expedition dokumentierten Wissenschaftler die Temperaturentwicklung in allen diesen Sphären und analysierten, wie sich diese gegenseitig beeinflussen. Ein Ergebnis lautet: Selbst am kältesten Wintertag gab es Temperaturunterschiede von bis zu 60 Grad Celsius! Wie aber kommen diese Zustände und was bedeuten sie für das Meereis, haben wir die AWI-Experten gefragt. Hier kommen ihre Antworten.



ATMOSPHERE:

WOLKENVERHANGEN ODER WOLKENLOS - DAS IST HIER DIE FRAGE

Wenn Meteorologen im Wetterbericht von der Lufttemperatur sprechen, meinen sie die Temperatur der Luft in zwei Meter Höhe über dem Erdboden. Dieser Wert ist für uns Atmosphärenforscher nur einer von vielen, denn mit unseren Radiosonden untersuchen wir das Temperaturprofil der Luftsäule bis in eine schwindelerregende Höhe von 35 Kilometern. Dazu haben wir im MOSAiC-Winter viermal täglich einen Wetterballon vom Hubschrauber-Deck des Forschungseisbrechers Polarsterns aus in den arktischen Himmel aufsteigen lassen und mithilfe eines kleinen Sensors durchgehend die Lufttemperatur, ihre Feuchte und den Luftdruck gemessen. Die GPS-Daten der Sonde dienen uns zudem zur Berechnung der Windstärke.

Die so gewonnenen Temperaturprofile zeigten auf den ersten Blick ein ähnliches Muster: In der winterlichen Arktis nimmt die Lufttemperatur mit zunehmender Höhe ab. Dokumentierte unser Sensor zum Beispiel in zwei Kilometer Höhe -20 Grad Celsius, waren es



US-amerikanische Forscher errichten zum Auftakt des Driftexperimentes einen Wasserturm auf der Scholle (l.), um die Energie- und Wärmeflüsse in den Luftschichten direkt über dem Eis zu erfassen. AWI-Forscherin Dr. Anja Sommerfeld (o.) dagegen kümmerte sich um die Messungen bis in 30 Kilometer Höhe.



DR. SANDRO DAHLKE

arbeitet als Atmosphärenforscher am Alfred-Wegener-Institut in Potsdam. Er nahm an zwei Teilabschnitten der MOSAiC-Expedition teil - am ersten sowie am letzten.

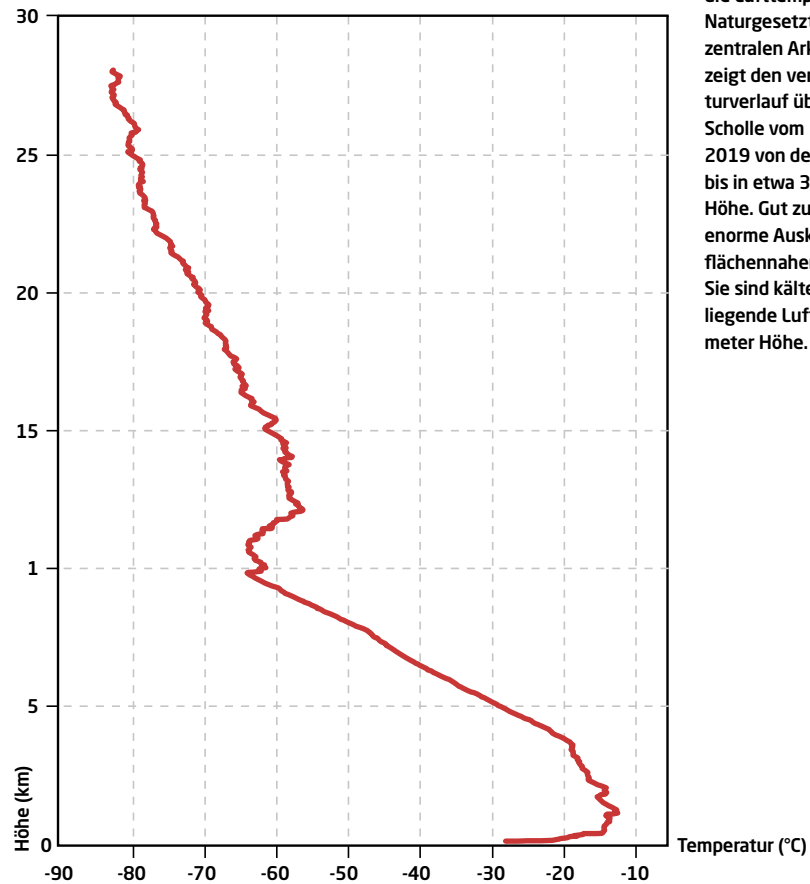
in etwa zehn Kilometer Höhe weniger als -60 Grad Celsius und in einer Höhe von mehr als 25 Kilometern stellenweise sogar weniger als -80 Grad Celsius. Der Temperaturunterschied zwischen den unteren Luftschichten und der Stratosphäre betrug demzufolge bis zu 60 Grad Celsius.

Die Tatsache, dass nicht nur in der Arktis, sondern überall auf der Welt die Lufttemperatur mit zunehmender Höhe sinkt, wird als sogenannte adiabatische Temperaturabnahme bezeichnet. Diese erklärt sich vereinfacht gesagt wie folgt: Am Boden herrscht hoher Luftdruck, da hier das Gewicht der ganzen Atmosphäre oder der gesamten Luftsäule auf einer Fläche lastet. Hoher Luftdruck wiederum bedeutet eine hohe Luftdichte und viele Luftmoleküle pro Volumen Luft. Damit steigt die Wahrscheinlichkeit von Zusammenstößen zwischen den Molekülen - und diese Stöße erzeugen Wärme. Je weiter jedoch unser Wetterballon in die Höhe aufsteigt, desto weniger Masse der Atmosphäre lastet dort theoretisch auf einer Fläche. Dementsprechend nehmen der Luftdruck, die Luftdichte und Wahrscheinlichkeit von Molekül-Kollisionen ab und die Lufttemperatur sinkt.

Aus Sicht des Meereises ist die Temperaturkurve in größer Höhe jedoch eher uninteressant. Für das Eis zählt in Sachen Atmosphäre, was an seiner Oberfläche und somit in der bodennahen atmosphärischen Grenzschicht passiert. Diese ist nur wenige Dutzende bis Hunderte Meter dick und im arktischen Winter an vielen Tagen erheblich kälter als die Luftmassen darüber. Woran aber liegt das? Zunächst einmal herrscht im arktischen Winter Polarnacht. Die Sonne steigt nicht über den Horizont und kann daher auch keine Strahlungsenergie eintragen. Gleichzeitig aber strahlen Erde, Meer und Eis auf natürliche Weise Wärme ab.

Befinden sich nun Wolken oder wasserdampfreiche Luft über dem Eis, absorbieren diese zunächst einen Teil der ausgehenden Wärmeenergie, erwärmen sich infolgedessen und

Die Temperaturkurve der arktischen Atmosphäre



Mit zunehmender Höhe sinkt die Lufttemperatur. Dieses Naturgesetz gilt auch in der zentralen Arktis. Diese Grafik zeigt den vertikalen Temperaturverlauf über der MOSAiC-Scholle vom 12. Dezember 2019 von der Eisoberfläche bis in etwa 30 Kilometer Höhe. Gut zu erkennen ist die enorme Auskühlung der oberflächennahen Eisschichten. Sie sind kälter als die darüber liegende Luft in 1 bis 4 Kilometer Höhe.

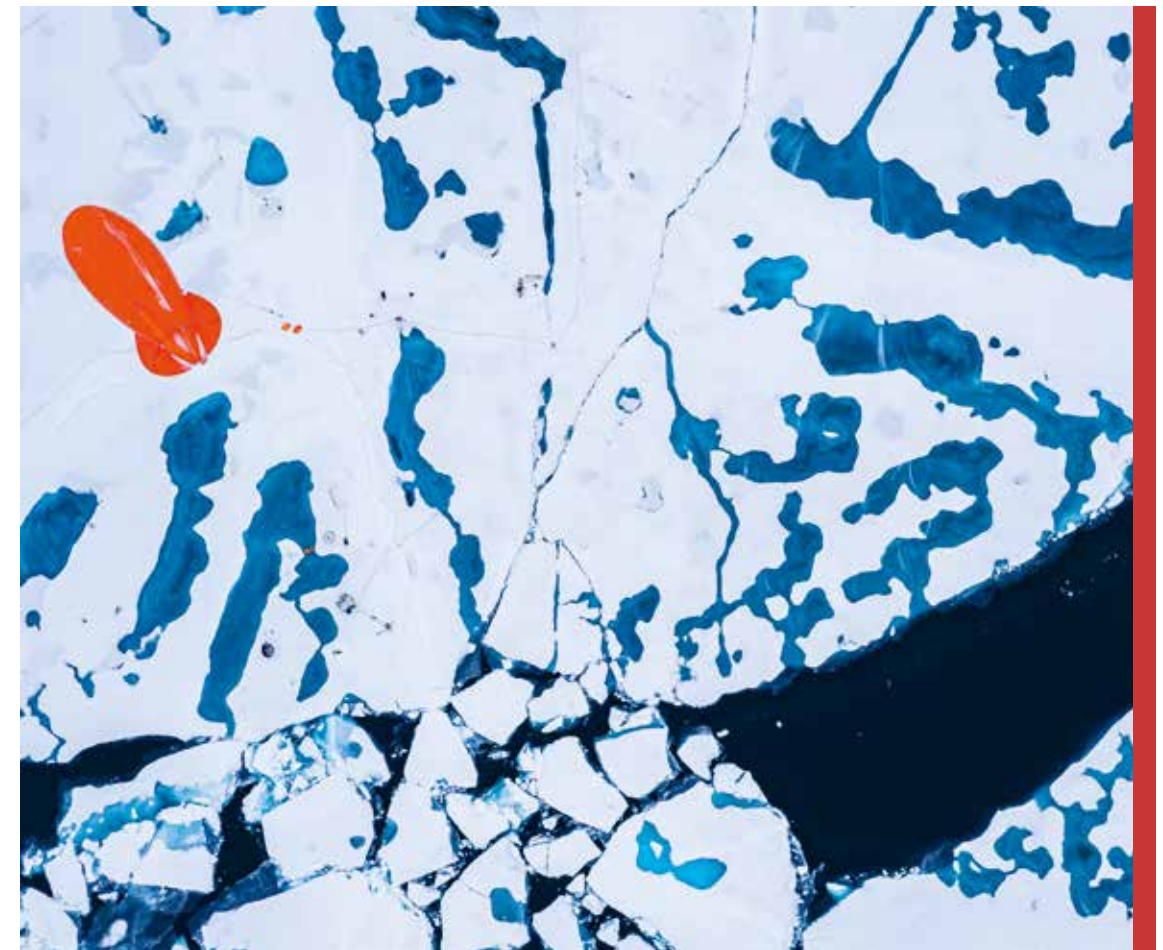
strahlen im Anschluss die Energie wieder Richtung Boden ab. Auf diese Weise erwärmen sie die unteren Luftschichten. Wolken machen hierbei wirklich einen Unterschied! War im MOSAiC-Winter der Himmel wolkenverhangen, betrug die Lufttemperatur auf dem Eis in der Regel um die -15 Grad Celsius. An wolkenlosen Tagen dagegen kühlte es sich im Extremfall auf bis zu -38 Grad Celsius ab, weil die abgestrahlte Wärme ungehindert Richtung Weltall entweichen konnte. Die Temperatur der bodennahen Luftschichten sinkt unter solchen Umständen besonders stark. An der Eisoberfläche ist es daher deutlich kälter als in zwei, zehn oder 20 Meter Höhe. Inversion nennen Meteorologen dieses Auskühlungsphänomen.

An den kältesten Wintertagen haben wir bei unseren Messungen auf der MOSAiC-Eisscholle Temperaturunterschiede von bis zu 4 Grad Celsius zwischen der Luft an der Eisoberfläche und der Luftschicht in 30 Meter Höhe gemessen. Diese Erkenntnis war nicht

nur relevant für die Meereisbildung; sie hatte für uns Forscher auch ganz praktische Bedeutung. Sie bedeutete nämlich, dass wir an wolkenlosen Tagen stets ein paar Grad Celsius von der Temperaturangabe unseres Schiffswetterberichtes abziehen mussten, wenn wir wissen wollten, wie kalt es tatsächlich auf dem Eis ist. Der Polarstern-Meteorologe beruft sich bei seinen Vorhersagen nämlich auf Messungen der Bord-Wetterstation und diese ist am Schiffsmast angebracht - in etwa 30 Meter Höhe.

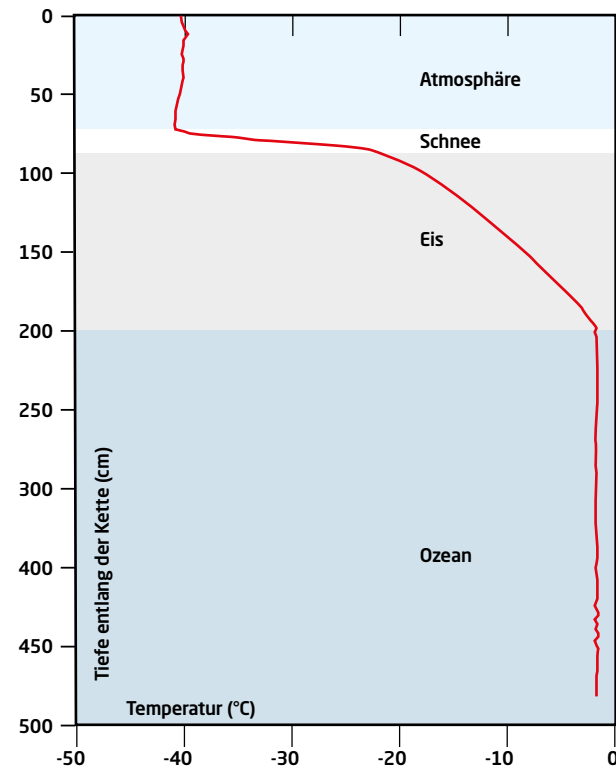
Dr. Anja Sommerfeld und Dr. Sandro Dahlke

Atmosphärenforscher am Alfred-Wegener-Institut Potsdam



Der Fesselballon „Miss Piggy“ schwebt für meteorologische Messungen hoch über dem Meereis der zentralen Arktis. Wer genau hinausschaut, kann am Ende des Seils einen Schlitten auf dem Eis entdecken, von dem aus AWI-Atmosphärenforscher Sandro Dahlke und ein Kollege den Ballon haben aufsteigen lassen.

Die Temperaturkurve von Schnee und Eis



Mit mehr als 30 digitalen Thermistor-Ketten haben die Meereisphysiker im Laufe der MOSAiC-Expedition die Temperaturveränderungen in Schnee und Eis verfolgt. Die dabei entstandenen Kurven zeigen, wie stark sich die Temperatur an den jeweiligen Sphärenübergängen verändert. In dieser Kurve markiert der erste Knick die Luft-Schnee-Grenze; der zweite den Schnee-Eisübergang und der dritte den Übergang vom Eis ins Meer.

SCHNEE UND MEEREIS: DIE KÄLTE-BREMSEN

Einer der kältesten Tage der MOSAiC-Expedition war für uns Meereisphysiker der 3. März 2020. An diesem Tag verzeichnete eine unserer Thermistor-Messketten eine Lufttemperatur von -43 Grad Celsius direkt über der Schneeschicht auf dem Eis. Diese Messketten sind etwa fünf Meter lang und reichen von der Oberfläche der Eisscholle durch Schnee und Eis hindurch bis in das Meer. Man kann sie sich wie eine LED-Lichterkette vorstellen. Anstelle der LED-Leuchten sind aber in einem Abstand von zwei Zentimetern kleine Temperatursensoren angebracht. Diese messen für uns die Temperatur in Schnee und Eis sowieso der obersten Wasserschicht und helfen uns zu verstehen, wie Wärmeenergie von einer Sphäre in die nächste wandert – oder aber wie Schnee die Auskühlung und damit auch das Wachstum des Meereises bremst. An dem extrem kalten Märztag dokumentierten die Sensoren in der obersten Schneeschicht -42 Grad Celsius. 30 Zentimeter tiefer, an der Schnee-Eis-Grenze waren es dann nur noch -8 Grad Celsius. Wir sehen also in einer gerade mal 30 Zentimeter dicken



Der Schweizer Forscher Dr. Martin Schneebeli und ein Kollege graben einen Schneeschacht für Untersuchungen der Schneedecke auf dem Meereis. Diese isoliert so gut, dass es an ihrer Unterseite etwa 20 Grad Celsius wärmer ist als an der Oberfläche.

Schneeschicht einen Temperaturunterschied von über 30 Grad Celsius. Das ist wirklich beeindruckend und zeigt, wie effektiv Schnee isoliert.

Im Meereis darunter ist der Temperaturabfall zwischen Ober- und Unterseite nicht mehr ganz so steil, weil das Eis deutlich weniger Luft enthält als Schnee und es Wärme deshalb besser leitet. Gemessen wird diese thermische Leitfähigkeit in Watt pro Meter Kelvin. Je geringer die Wärmeleitfähigkeit eines Materials, desto besser isoliert es. Schnee beispielsweise besitzt eine thermische Leitfähigkeit von 0,1 bis 0,4 Watt pro Meter Kelvin; beim Meereis sind es 2 Watt pro Meter Kelvin. Das heißt, Schnee isoliert fünf- bis 20-mal besser als Meereis.

Beim Blick auf das Eis-Temperaturprofil vom 3. März stellen wir fest, dass die Scholle nach unten hin immer wärmer wird. Waren es an der Eisoberfläche noch -8 Grad Celsius, so betrug die Temperatur an der Eisunterseite -1,8 Grad Celsius, was dem Gefrierpunkt des Meerwassers entspricht. Im Prinzip ist die winterliche Temperaturentwicklung im Meereis so einfach, dass wir die meisten Profile mit einem Lineal zeichnen könnten. Man muss nur die Eisdicke und die Ausgangstemperatur an der Schnee-Eisgrenze kennen. Hat man



Meereisphysiker Jakob Belter installiert eine Schneeboje auf der MOSAiC-Scholle. Diese misst mit vier nach unten gerichteten Ultraschallsensoren die Entfernung bis zur Schnee- oder Eisoberfläche.

beides, legt man das Lineal am Ausgangswert an und zeichnet über die Eisdicke hinweg einen geraden Strich bis zur Gefrieretemperatur des Meerwassers von $-1,8$ Grad Celsius. Das funktioniert allerdings nur im Winter. Wenn im Frühling die Luft- und Wassertemperaturen steigen, erwärmt sich das Meereis gleichzeitig von oben und unten, wobei es in der Mitte zunächst kalt bleibt. Das Temperaturprofil ist dann keine Gerade mehr, sondern ähnelt eher der Form einer Banane.

Wärme ist ein gutes Stichwort, denn sie kann die Wärmeleitfähigkeit des Schnees deutlich verändern, wie wir auf der MOSAiC-Expedition zum ersten Mal live vor Ort beobachten konnten. Bis in den April hinein bestand die Schneedecke vor allem im unteren Teil aus vielen besonders großen Schneekristallen. Diese ließen viel Raum für Luft, welche sich ja nur langsam erwärmt und demzufolge Wärme schlecht leitet. Als dann im April ein sogenannter Wärmeeinbruch erfolgte und innerhalb weniger Stunden die Lufttemperatur über der MOSAiC-Scholle plötzlich anstieg, konnten wir mit ansehen, wie die Wärme von oben in die Schneeschicht wanderte und deren Struktur veränderte. Die großen Schneekristalle wurden kleiner, der Platz für Lufteinschlüsse nahm ab. Nahezu zeitgleich veränderten sich die Wärmeflüsse zwischen Atmosphäre, Eis und Ozean. So dauerte es beispielsweise eine Woche, bis das Wärmesignal aus der Luft einmal ganz durch den Schnee und das Meereis hindurchgewandert war. Dank dieser und vieler anderer Beobachtungen haben wir jetzt eine deutlich klarere Vorstellung davon, auf welchen Größenskalen diese für unsere Meereisforschung so wichtigen Prozesse ablaufen. Wir verstehen zudem besser, wie die einzelnen Komponenten dieses komplexen Systems zusammenpassen – ein Erkenntnisgewinn, der uns ohne MOSAiC verwehrt geblieben wäre.

Dr. Stefanie Arndt, Dr. Christian Katlein und Daniela Krampe
Meereisphysiker am Alfred-Wegener-Institut in Bremerhaven.



Dieses Zelt heißt „Ocean City“, weil sich darin der Arbeitsplatz der Ozeanographen befindet. Durch ein Loch im Eis und im hölzernen Zeltboden lassen die Forscher ihr wichtigstes Messgerät, die CTD-Sonde, zu Wasser.

OZEAN

WIE LANGE HÄLT DIE KALTE SCHUTZSCHICHT?

Temperaturunterschiede, wie sie die Meereisphysiker und die Atmosphärenforscher im arktischen Winter messen, finden wir Ozeanographen im Meer nicht, weil Meereis und Schnee den Arktischen Ozean sehr wirkungsvoll von der Atmosphäre abschirmen. Außerdem kann unser Element, das Wasser, in seiner flüssigen Form kaum kälter werden als sein Gefrierpunkt – und der liegt in der zentralen Arktis bei $-1,8$ Grad Celsius. Die einzige Ausnahme bildet das sogenannte superkalte oder unterkühlte Wasser. Dessen Temperatur sinkt bis zu $0,01$ Grad Celsius unter den Gefrierpunkt des Meerwassers. Es gefriert dabei jedoch nicht sofort, weil sogenannte Kristallisationskeime fehlen, an denen die ersten Eiskristalle entstehen könnten.

Extreme Kälte über der MOSAiC-Scholle machte sich für uns Ozeanographen vor allem dadurch bemerkbar, dass das Meereis schneller wuchs – in Spitzenzeiten um bis zu acht Zentimeter pro Woche. Das heißt, an seiner Unterseite gefror mehr und mehr Wasser: Ein Prozess, bei dem jede Menge Salzlake aus dem Eis in das Oberflächenwasser rinnt und dessen Salzgehalt in die Höhe treibt. Wasser mit einem zunehmenden Salzgehalt wiederum wird schwerer und sinkt langsam ab. Das Meereis schafft sich auf diese Weise seine eigene Schutzschicht aus kaltem Wasser. Diese legt sich wie ein Deckel auf die in größerer



DR. MARIO HOPPMANN

forscht in der Sektion Physikalische Ozeanographie am Alfred-Wegener-Institut. Er hat auf zwei Teilabschnitten der MOSAiC-Expedition ozeanographische Messungen durchgeführt und war mitverantwortlich für die Installation von Bojen und autonomen Messsystemen.

Tiefe zirkulierenden wärmeren, noch salzreicheren und damit schwereren Wassermassen, die aus dem Nordatlantik in den Arktischen Ozean eingewandert sind und aufgrund ihrer Wärme eine echte Bedrohung für das Meereis darstellen - sollten sie es schaffen, zur Meeresoberfläche aufzusteigen.

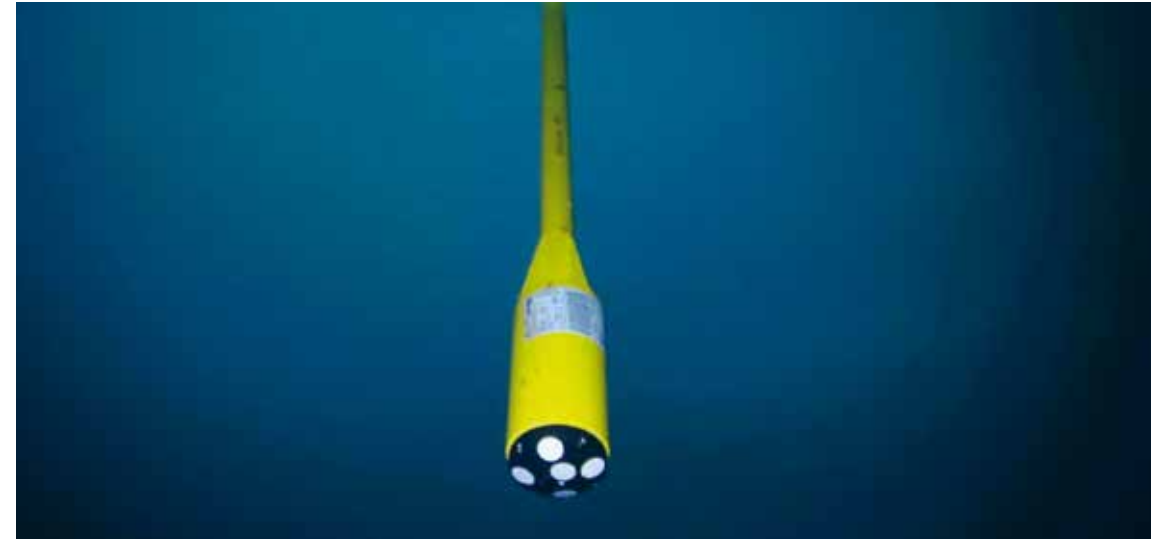
Salzlake entsteht, wenn Meerwasser gefriert. Das im Wasser enthaltene Salz wird dabei nicht im Eiskristallgitter miteingeschlossen, sondern sammelt sich zunächst in Form von Salzlake in den kleinen Poren und Kanälen des Meereises. Im Anschluss rinnt die Lake an der Eisunterseite ins Meer.

Wenn wir uns die Schutzschicht unter dem Meereis genau anschauen, sind es sogar zwei Wassermassen, die hier zusammenwirken. Ganz oben befindet sich die sogenannte Vermischungs- oder auch Deckschicht. Sie speist sich aus dem Süßwasser, welches die vielen Flüsse eintragen, die in den Arktischen Ozean münden. Demzufolge ist das Wasser der Vermischungsschicht am Anfang des Winters auch sehr leicht und liegt oben auf. Erst durch die Eisbildung und das „Ausfällen“ der **Salzlake** wird es etwas schwerer und die Schicht den Winter über immer dicker. Dieses Wachsen konnten wir auch auf der MOSAiC-Expedition beobachten. War die Vermischungsschicht unter der MOSAiC-Scholle am Anfang unserer Drift etwa 20 Meter dick, konnten wir sie im Monat Mai 2020 bis in eine Tiefe von 120 Metern nachweisen.

An die Vermischungsschicht grenzt von unten die zweite Schutzschicht an - die sogenannte kalte Halokline. Der Begriff „Halokline“ kommt aus dem Griechischen und bezeichnet eine Übergangszone zwischen Wassermassen unterschiedlichen Salzgehalts. Das heißt, die Wassermassen der Halokline werden mit zunehmender Tiefe immer salziger - so lange, bis sie in einer Wassertiefe von etwa 200 Metern genauso salzig sind wie das darunter-



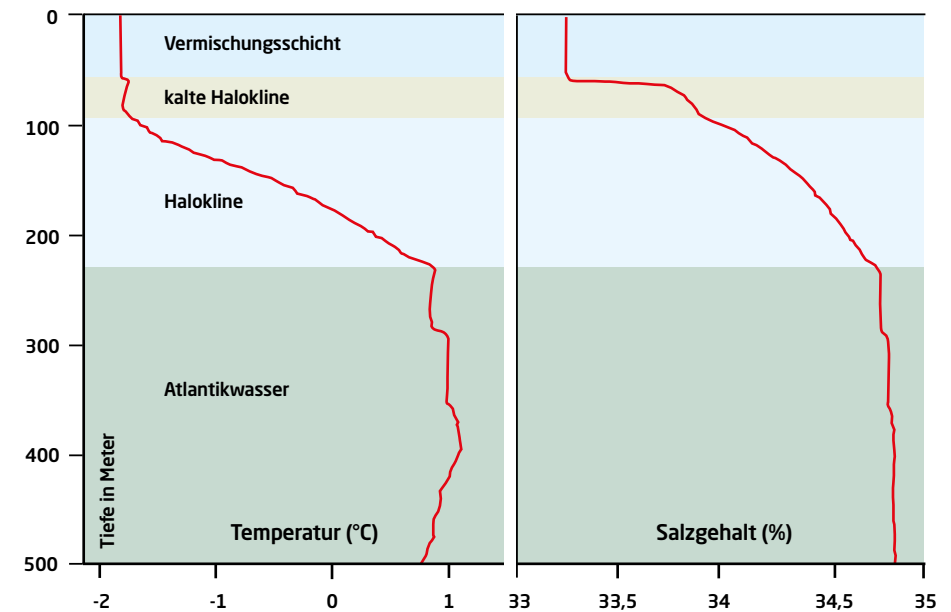
Als sich am Morgen des 23. Januar 2020 eine Rinne im Meereis bildet, greifen die Ozeanographen Dr. Volker Mohrholz und Dr. Benjamin Rabe zur Angel und lassen eine Mikroturbulenzsonde in die Tiefe. Die Sonde misst die Temperatur, den Salz- und Sauerstoffgehalt sowie Verwirbelungen des Wassers.



Dieser akustische Doppler-Strömungsmesser ist eines der vielen Messinstrumente, die unter der MOSAiC-Scholle zum Einsatz kamen.

Leicht nach oben, schwer nach unten

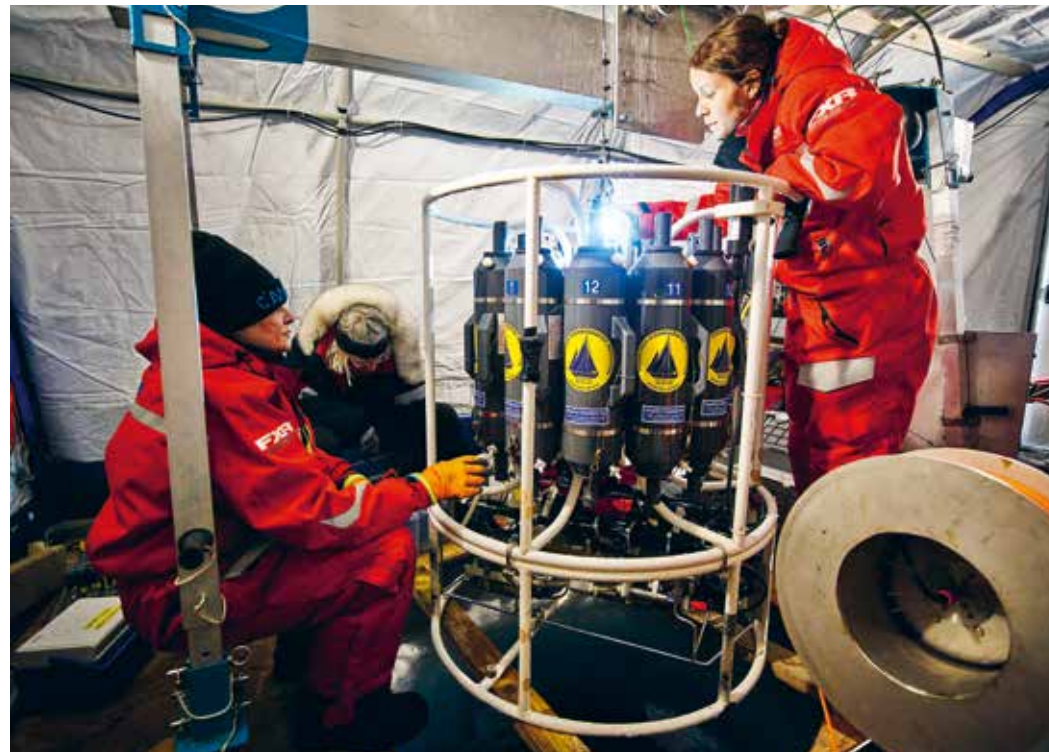
Die Temperatur und der Salzgehalt einer Wasserschicht entscheiden darüber, wie schwer das Wasser ist und bis in welche Tiefe es hinabsinkt. Dieses Temperatur- und Salzgehaltsprofil zeigt, wie klar die einzelnen Wassermassen unter der MOSAiC-Scholle voneinander zu unterscheiden sind.



Weil Meerwasser Salz enthält, gefriert es im Gegensatz zu Süßwasser nicht bei einer Temperatur von 0 Grad Celsius, sondern erst bei deutlich kälteren minus 1,8 Grad Celsius.

liegende wärmere Atlantikwasser. Eine solche Salzgehaltschichtung der Wassermassen findet man in vielen Meeresgebieten der Welt. Das Besondere im Arktischen Ozean ist jedoch, dass in der kalten Halokline zwar der Salzgehalt mit zunehmender Tiefe steigt, die Wassertemperatur aber ziemlich dicht am **Gefrierpunkt** bleibt - ganz ungeachtet dessen, dass das Atlantikwasser in der Schicht darunter ungefähr ein Grad Celsius misst und damit deutlich wärmer ist.

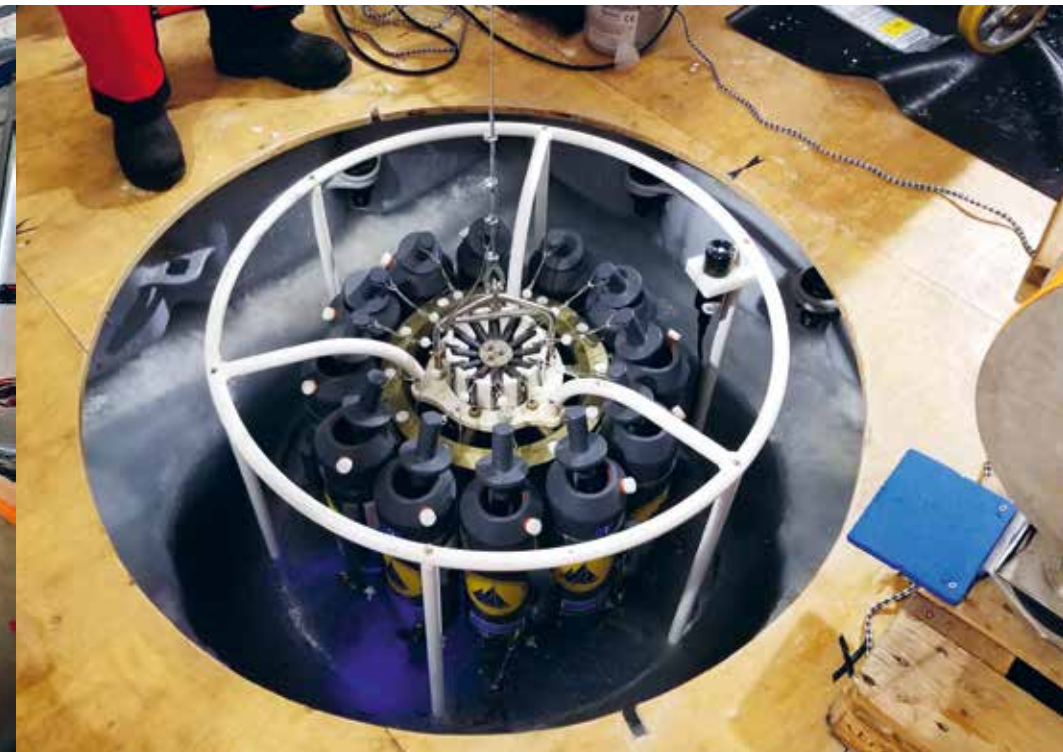
Theoretisch geht man bislang davon aus, dass die viele Salzlake aus dem Meereis die Schichtung der Wassermassen im zentralen Arktischen Ozean verstärkt - und zwar in einem solchen Ausmaß, dass es kaum Wirbel oder Turbulenzen gibt, die stark genug sind, um nennenswerte Mengen des wärmeren Atlantikwassers aus der Tiefe an die Meeresoberfläche zu transportieren. Aber entspricht diese Annahme in Zeiten des Klimawandels und Meereisrückganges noch der Wahrheit oder gelangt doch schon auf irgendeine Weise warmes Wasser aus der Tiefe an die Eisunterseite? Eine Möglichkeit wären zum Beispiel kilometergroße Wasserwirbel, wie wir sie aus dem Südpolarmeer kennen. Die Wissenschaft spricht ihnen eine wichtige Rolle beim Wärmeaustausch zwischen oberer und unterer Wasserschicht zu.



AWI-Ozeanographin Dr. Janin Schaffer (r. im Bild) und ihre Kollegen positionieren die CTD-Sonde mit dem dazugehörigen Wasserkransschöpfer für einen Messtauchgang über dem Einstiegsloch.

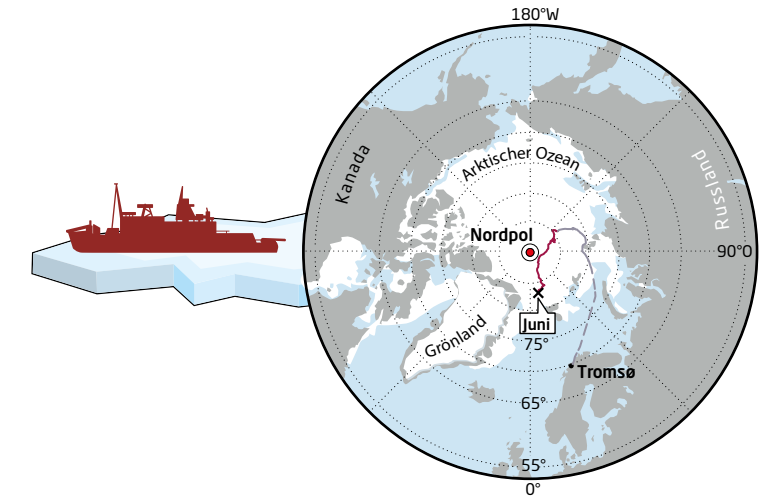
Um herauszufinden, ob es solche Wirbel auch in der zentralen Arktis gibt, hat das Ozean-Team der MOSAiC-Expedition ein umfangreiches Messprogramm durchgeführt. Dabei kam nicht nur unser Wasserkransschöpfer für Messungen der Wassertemperatur, des Wasserdrucks und der Leitfähigkeit (Salzgehalt) zum Einsatz, sondern auch Strömungsmesser und Mikrostruktursonden. Letztere erfassen die turbulente Durchmischung des Wassers in sehr hoher Auflösung. Dieses Messprogramm wurde durch Dutzende, unabhängig messende Instrumente ergänzt, die an Bojen hängend zu Beginn der Expedition in einem Radius von 30 Kilometern um die Hauptscholle herum installiert wurden und uns ermöglichen, die Größe und Geschwindigkeit dieser Wirbel zu untersuchen. Die vielen Daten müssen jetzt ausgewertet werden. Wenn alle Ergebnisse vorliegen, werden wir im Detail sagen können, ob unsere Vorstellung vom Zusammenspiel der Wassermassen im Arktischen Ozean noch der Wirklichkeit entspricht und die Kälte von oben immer noch ausreicht, das Meereis vor der Wärme aus der Tiefe zu schützen.

Dr. Mario Hoppmann und Dr. Janin Schaffer
Ozeanographen am Alfred-Wegener-Institut in Bremerhaven



Die Sonde misst die Wassertemperatur bis auf ein Zehntausendstel Grad genau. Die Flaschen des Wasserkransschöpfers lassen sich auf Knopfdruck einzeln und in verschiedenen Tiefen schließen.

Verschiedene Algenblüten verfärben im Frühjahr das Wasser der arktischen Tschuktschensee. Durch den Zufluss kalten, nährstoffreichen Wassers aus dem Beringmeer findet das Phytoplankton hier beste Voraussetzung, um große Blüten zu bilden.



DriftStory 09

Algen in der Arktis: Nichts scheint unmöglich

Für Algen hält das Leben im Nordpolarmeer zwei Herausforderungen bereit: Die Sonne verschwindet für mehr als 100 Tage pro Jahr, zudem bremst die Schichtung des Wassers die Nährstoffzufuhr aus der Tiefe. Wie aber schaffen es die grünen Winzlinge dennoch, die Polarnacht zu überleben? AWI-Biologin Clara Hoppe und ihr Team haben einige der Überlebensstrategien entschlüsselt.

Gäbe es eine Meisterschaft im Wasser filtrieren, hätte AWI-Biologin Dr. Clara Hoppe durchaus Siegchancen. Als Meeresbiologin mit dem Schwerpunkt pflanzliches Plankton des Arktischen Ozeans trainiert sie diese Disziplin auf Expeditionen nahezu täglich. Denn gerade im Winter ist die Zahl der im Wasser schwebenden Algen (Phytoplankton) so gering, dass die Wissenschaftlerin zum Auftakt ihrer Untersuchungen erst einmal etwa 40 Liter Meerwasser durch eine Gravitationsfiltereinheit laufen und die darin enthalte-

ne Algengemeinschaft auf wenige Milliliter konzentrieren muss, bevor sie überhaupt mit diesen arbeiten kann.

In der winzigen Wasserprobe tummeln sich dann Vertreter einer wahrlich hartgesottenen Organismengruppe. Arktische Algen führen nämlich ein Leben der Extreme: Sonnenlicht, welches sie zur Photosynthese und zum Wachsen benötigen, steht an mehr als 100 Tagen pro Jahr gar nicht zur Verfügung. Und wenn die Sonne doch über den Horizont lugt, schirmt das Meereis den Ozean wie eine Jalousie ab, sodass es zumindest am Anfang nur wenig Licht bis in die Wassersäule schafft.

Begrenzt ist zudem die Versorgung der Algen mit überlebenswichtigen Nährstoffen wie Nitrat und Silikat. Diese sind im Meerwasser gelöst, je nach Wasserschicht allerdings in unterschiedlichen Konzentrationen und Tiefen. Aufgrund der starken temperatur- und salzbedingten Schichtung der Wassermassen im Arktischen Ozean vermischen sich das nährstoffarme Oberflächenwasser und das darunterliegende nährstoffreichere Tiefenwasser jedoch nur selten. Das bedeutet: Sind die Nährstoffe im Oberflächenwasser aufgebraucht, gibt es nur im Ausnahmefall Nachschub aus der Tiefe.



Ihre Suche nach den Überlebenstricks der arktischen Algen hat Clara Hoppe vor sechs Jahren im Wissenschaftsdorf Ny-Ålesund auf Spitzbergen begonnen. Wasserproben kann sie dort direkt im Hafenecken nehmen.

FÜR DAS MENSCHLICHE AUGE KAUM WAHRNEHMBAR

Trotz dieser Widrigkeiten überleben mehrere hundert Algenarten den Winter in der zentralen Arktis – und viele von ihnen können wachsen und sich teilen, noch bevor die Sonne tatsächlich über den Horizont steigt. Wie genau aber die Algen die Zeit der Dunkelheit überstehen und woher sie am Ende der langen Polarnacht die Energie zur Zellteilung nehmen, ist noch nicht genau bekannt und der Grund, warum Clara Hoppe unbedingt an der MOSAiC-Expedition teilnehmen wollte. „Wir erforschen seit mehreren Jahren die Algengemeinschaft im arktischen Kongsfjord auf Spitzbergen und wissen daher, dass den Algen in der Wassersäule winzige Mengen Licht genügen, um ihren Stoffwechsel anzuwerfen. Wir sprechen hierbei von Lichtveränderungen, die so klein sind, dass wir Menschen sie gar nicht richtig wahrnehmen“, erzählt die Wissenschaftlerin. Viele der untersuchten Algenarten sind sogar den gesamten Winter über aktiv. Wie ihnen das gelingt und ob das Meereis dabei eine Rolle spielt, sind zwei der vielen offene Fragen.

Allerdings gibt es rund um Spitzbergen kaum noch Meereis, sodass Clara Hoppe dessen Einfluss auf die Überlebenschancen der Algen noch nicht ausgiebig untersuchen konnte. Zudem kann sie sich bei Probenahmen in Spitzbergen nie ganz sicher sein, ob die untersuchten Algen wirklich den gesamten Winter in der Arktis verbracht haben. Vor der Westküste Spitzbergens fließt nämlich der gleichnamige Westspitzbergenstrom. Er transportiert relativ warmes Wasser aus dem Nordatlantik Richtung Norden. Es wäre demzufolge gut möglich, dass ein Teil der Algengemeinschaft im Kongsfjord aus dem Nordatlantik stammt und die Polarnacht gar nicht in voller Länge erlebt hat. Auf der MOSAiC-Expedition aber waren solche Unsicherheitsfaktoren so gut wie ausgeschlossen. Die Drift bot der Meeresbiologin die einmalige Chance, das Überwintern und Aufwachen des arktischen Phytoplanktons über Monate hinweg zu beobachten und dabei auf Methoden und zusätzliche Messungen zurückzugreifen, die ohne das interdisziplinäre Forscherteam an Bord des Eisbrechers Polarsterns nicht zur Verfügung gestanden hätten.

DREI HYPOTHESEN - ABER WELCHE STIMMT?

Die Frage, wie die arktischen Algen Kälte und Dunkelheit überstehen, treibt Polarbiologen bereits seit mehr als einem Jahrhundert um. Als sogenannte Primärproduzenten bilden Algen nämlich das Fundament der Nahrungsnetze im Arktischen Ozean. Ohne das pflanzliche Plankton fänden weder Ruderfußkrebse noch Polardorsche, Ringelrobbe oder Eisbären Nahrung. Bis heute haben sich drei verschiedene Erklärungsansätze herauskristallisiert: Zuerst nahmen die Forscher lange an, dass nicht nur die bekannten Eisalgen sich im Meereis einfrieren lassen und darin überwintern, sondern die gesamte Algengemeinschaft und damit auch jene Algen, die hauptsächlich in der Wassersäule zu finden sind. Im Frühjahr, wenn die Luft- und Wassertemperaturen dann steigen, so die Hypothese, werden die Algen aus dem Eis herausgeschmolzen, besiedeln die Wassersäule und starten große Algenblüten. „Diese Samenbank-Hypothese gilt mittlerweile als überholt, weil sich das Artenspektrum in der Wassersäule deutlich von der Algengemeinschaft des Meereseises unterscheidet. Es gibt zwar durchaus Arten, die in beiden Lebensräumen vorkommen, ihr Anteil ist aber gering“, kommentiert Clara Hoppe.

Kieselalgen sind mikroskopisch kleine einzellige Algen, deren Zellhülle überwiegend aus Siliziumdioxid besteht. Fachleute unterscheiden etwa 6000 verschiedene Arten und bezeichnen die Kieselalgen auch als Diatomeen.

Die zweite Hypothese setzt darauf, dass die Algen den Winter dank besonderer Vorkehrungen überleben. „Viele arktische **Kieselalgen** bauen sich vor Beginn der Polarnacht richtig dicke, harte Schalen, die sie davor schützen, von Ruderfußkrebse und anderem Zooplankton gefressen zu werden“, erklärt die Meeresbiologin. In den Küstengewässern sinken die Winzlinge dann auf den Meeresboden. Dort überwintern sie und steigen mit der Rückkehr des Lichts wieder in die Wassersäule auf. „Aus anderen Regionen des tiefen Ozeans wissen wir, dass sich die für den Winter gewappneten Algen auf der Sprungschicht ansammeln, also in jener Wassertiefe, wo die Dichteunterschiede in der Wassersäule besonders hoch sind. Im Zuge von Winter- und Frühjahrsstürmen werden sie dann wieder Richtung Meeresoberfläche hochgewirbelt“, so die Wissenschaftlerin. Für die zentrale Arktis allerdings konnten Algenansammlungen an der Sprungschicht noch nicht nachgewiesen werden. „Ich hatte die Hoffnung, dass wir auf MOSAiC entsprechende Proben nehmen können. Bei unseren Untersuchungen aber stellte sich heraus, dass unter unserer Scholle eine solche Schicht nicht auffindbar war“, erzählt sie.

Kommt deshalb eher der dritte Erklärungsansatz in Frage? Er hat in den zurückliegenden Jahren viele neue Unterstützer gefunden und besagt, dass Algen gar keine reinen Pflanzen sind, die sich ausschließlich durch Photosynthese ernähren. Stattdessen nehmen Algen wie Tiere auch organisches Material auf, indem sie teilweise wirklich aktiv Bakterien fressen oder im Wasser gelöste organische Verbindungen veratmen. „Diese als Mixotrophie bezeichnete Überlebensstrategie sehen wir in allen Gruppen. Egal, welche Algen wir uns anschauen, sie können es irgendwie alle. Es scheint daher unter den arktischen Algen



Die Versuchsanordnung aus dem Forschungslabor auf Spitzbergen (l.) hat Clara Hoppe an Bord des Forschungsschiffes Polarstern nachgebaut. Bevor die vielen Algenexperimente jedoch beginnen konnten ...

kaum reine Pflanzen zu geben, die nur auf die Photosynthese angewiesen sind“, erzählt Clara Hoppe.

WIE VIELE ALGEN FRESSEN RUDERFUSSKREBSE UND CO?

Um bei der Suche nach neuen Erkenntnissen keinen Anhaltspunkt zu übersehen, geht das Biologenteam auf der MOSAiC-Scholle bis an seine Belastungsgrenze. Clara Hoppe: „Wir haben unglaublich viele Parameter gemessen – angefangen bei den Nährstoffen und der Karbonatchemie über den Chlorophyllgehalt, die Pigmentzusammensetzung, die Primär- und Bakterienproduktion, die Artenzusammensetzung, DNA- und RNA-Analysen, um nur einige zu nennen. Hinzukamen dann noch Mikroskopie-Arbeiten, Experimente an Bord, Nahrungsnetzstudien vom Zooplankton bis zum Fisch und Beprobungen vieler chemischer Parameter, die wir für andere Arbeitsgruppen mitgemacht haben. Alles in allem war es eine echte Herausforderung, den Überblick zu behalten.“

Um zum Beispiel herauszufinden, in welchem Ausmaß hungrige Ruderfußkrebse die Zahl der Algen dezimieren, setzten die Wissenschaftler ein paar ausgewählte Kriebstierchen in Flaschen gefüllt mit Algen und Wasser und zählten, wie viel Phytoplankton nach einem Tag noch übrig war. In einem zweiten Experiment füllten sie Meereis sowie Wasser von der Meeresoberfläche und aus größerer Tiefe in Flaschen ab, bestrahlten diese über Wochen mit zunehmendem Licht und beobachteten, welche Lebensformen sich darin entwickelten. „Teilweise hat es bis zu zweieinhalb Monate gedauert, bis wir eine echte

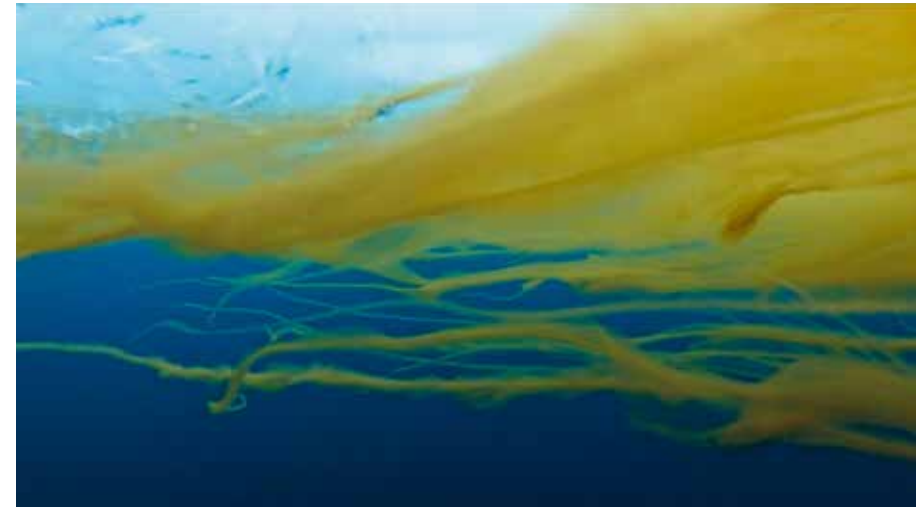


... mussten die Meeresbiologin (r.) und ihr Kollege Dr. Anders Torstensson (l.) ein Loch durch die MOSAiC-Scholle bohren und jede Menge Wasser samt Algen in ihre drei Probenkanister pumpen.



Blüte sehen konnten. Aber in allen Proben fanden wir genügend Organismen, die alle auch in einer klassischen Frühjahrsblüte vorkommen. Das heißt, sowohl das Meereis als auch das Oberflächen- und Tiefenwasser sind mögliche Quellen einer Algenblüte in der Wassersäule. Welche jedoch am Ende das Rennen macht, hängt vermutlich von ganz vielen unterschiedlichen Parametern ab“, erklärt die Wissenschaftlerin.

Eine sogenannte Lichttarfe, entwickelt vom Hamburger Meereisexperten Prof. Dirk Notz, nutzte das MOSAiC-Team, um das Lichtspektrum im Meereis in hoher Auflösung zu vermessen. Wenn die Wissenschaftler nun diese Daten mit den Unter-Eis-Lichtmessungen des AWI-Unterwasserroboters und des Wasserkransschöpfers kombinieren, lässt sich nachverfolgen, wie sich die Lichtfelder unter der MOSAiC-Eisscholle im Laufe der Zeit verändert haben. „Ich werde diese verschiedenen Lichtdaten mit meinen Primärproduktionsdaten abgleichen – in der Hoffnung, dass ich anschließend sagen kann, ob die Algen wirklich so stark gewachsen sind, wie sie es dem Lichtniveau nach hätten tun sollen oder nicht. Lautet die Antwort nein, könnte das zum Beispiel am Zooplankton liegen“, sagt die Meeresbiologin und fügt hinzu: „Ich glaube mittlerweile, dass die Algen der Wassersäule keine wirkliche Überwinterungsstrategie verfolgen. Sie sind einfach da und weil es



Ein Forscher setzt die neu entwickelte Lichttarfe (l.) in ein Loch, welches in den älteren Teil der MOSAiC-Scholle gebohrt wurde. Das Gerät misst die Lichtmenge im Eis. Seine Daten helfen Meeresbiologen wie Clara Hoppe zu verstehen, wieviel Licht den Algen im Eis und darunter zu welchem Zeitpunkt zur Verfügung steht. Die arktische Kieselalge *Melosira arctica* (o.) kann man sogar mit bloßem Auge erkennen. Die nur 30 Mikrometer kleinen Einzeller bilden bis zu mehrere Meter lange Ketten und Matten, die Vorhängen gleich an der Unterseite des Meereises herabhängen.

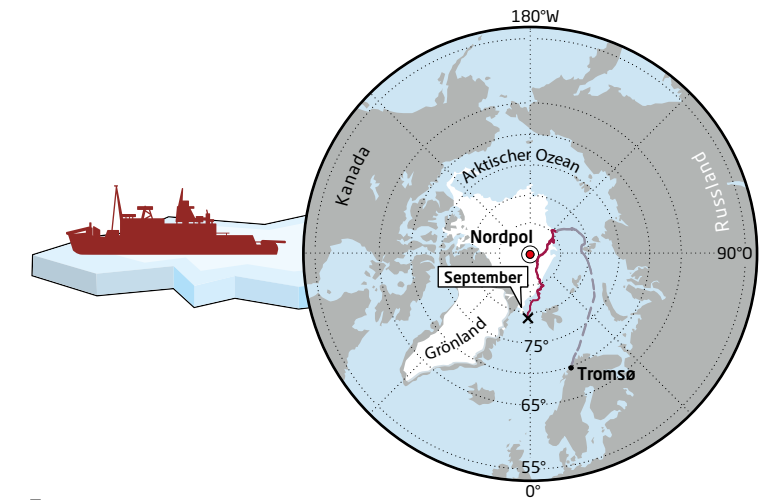
kalt und dunkel ist, nimmt ihr Chlorophyll auch keinen Schaden. Wenn die Algen es dann irgendwie schaffen, nicht gefressen zu werden, sind sie am Ende der Polarnacht da und bereit für die neue Saison.“

Was aber bedeuten diese neuen Einblicke für die große Frage nach der Produktivität arktischer Algen? Clara Hoppe: „Ich schlussfolgere daraus, dass wir bei unseren Analysen und Berechnungen Prozesse wie das Abweiden der Algen durch das **Zooplankton** oder aber das Recycling von Nährstoffen viel stärker mitberücksichtigen müssen.“ Detailwissen und genaues Prozessverständnis seien dabei nicht nur bei großen, weithin sichtbaren Frühjahrsblüten wichtig, sondern auch schon zu einem viel früheren Zeitpunkt. „Es gibt in der Wissenschaft eine lange Debatte darüber, was man eigentlich als Algenblüte definiert und wann diese losgeht. Ich persönlich spreche von einer Algenblüte, wenn ich einen konstanten Biomasseanstieg sehe, selbst wenn die Gesamtmenge der Algen noch unglaublich niedrig ist. Für das Nahrungsnetz und die Nährstoffkreisläufe im Arktischen Ozean kann sie durchaus schon relevant sein“, erklärt die Wissenschaftlerin.

Dies macht ihre Forschung nicht unbedingt leichter, vor allem weil Chlorophyll-Sensoren auf Satelliten, an Bojen oder aber in den sogenannten ARGO-Gleitern (autonome Treibbojen zur Erfassung von Temperatur, Salzgehalt, Strömungen und zunehmend auch chemischer und biologischer Komponenten) noch nicht in der Lage sind, diese gerade beginnenden Algenblüten zu detektieren. Clara Hoppe: „Aus diesem Grund stellen wir uns an jedem Tag aufs Neue hin und filtern Wasser – Liter für Liter für Liter!“ ■

Als Zooplankton werden alle tierischen Organismen bezeichnet, die frei schwebend im Meer leben. Zu den bekanntesten Vertretern gehören Kammerlinge, Flügelschnecken, Rädertierchen, Fischlarven, Strahlen-, Wimper- und Moostierchen sowie verschiedene Kleinkrebse wie Ruderfußkrebse, Krill, Flohkrebse und viele andere.

Die beiden Forschungsflugzeuge POLAR 5 und POLAR 6 warten auf dem Flugplatz von Longyearbyan, Spitzbergen, auf ihren MOSAiC-Einsatz. POLAR 6 im Bildhintergrund trägt den Meereisdickensensor EM-Bird am Rumpf montiert.



DriftStory 10

Ein Wiedersehen am Ausgangstor der Arktis

Die AWI-Meereisphysiker Thomas Krumpen und Jakob Belter waren zwei der ersten Wissenschaftler, die im Spätherbst 2019 das Umfeld der MOSAiC-Eisscholle erkundet haben. Die Eisfläche stand damals noch am Anfang ihrer Reise durch die zentrale Arktis. Elf Monate später kehren die Forscher zur Scholle zurück, um diese nochmals zu vermessen - diesmal allerdings vom Flugzeug aus und vor der Küste Nordostgrönlands, dem anderen Ende der Transpolardrift.

Wie sich die Bilder ähneln: Als AWI-Meereisphysiker Dr. Thomas Krumpen am Mittwoch, den 2. September 2020, im Flugzeug über die weit verteilten Reste der ehemaligen MOSAiC-Eisscholle und vieler ihrer Nachbarschollen hinwegfliegt, fühlt er sich unweigerlich an seine erste Begegnung mit dieser besonderen Meereisfläche im Oktober 2019 erinnert. Wieder haben die ersten kalten Herbstnächte die Meereisoberfläche überfrieren lassen; wieder überzieht eine Schicht neuen Eises die vielen Schmelztümpel. Löcher sowie Stellen mit instabilem, von der Sommerwärme zersetztem Eis werden abermals von Schnee kaschiert, sodass die Eisdecke insgesamt viel intakter aussieht als sie es eigentlich ist.



POLAR 6 ist eines von zwei deutschen Polarforschungsflugzeugen vom Typ Basler BT-67. Die Propellermaschine kommt sowohl in der Arktis als auch in der Antarktis zum Einsatz und wird für jeden Einsatz mit spezieller Forschungstechnik ausgerüstet.

Wüsste Thomas Krumpen nicht genau, in welchem Teil der Arktis er und sein Kollege Jakob Belter sich gerade aufhalten, könnte der Wissenschaftler an ein Fortleben der MOSAiC-Scholle glauben. Allein der Ort des Wiedersehens schließt einen solchen Gedanken aus. Das Forschungsflugzeug **POLAR 6** fliegt an diesem Tag über der Framstraße. Dieses Meeresgebiet liegt zwischen Spitzbergen und Ostgrönland und gilt als das größte Ausgangstor des Arktischen Ozeans. In den Wintermonaten Oktober bis April wandern jedes Jahr aufs Neue rund 1600 Kubikkilometer arktisches Meereis durch die Framstraße hindurch in den Nordatlantik und damit in den sicheren Wärmetod. Nur mal zum Vergleich: Das Schmelzwasser dieser Menge Meereis würde ausreichen, um den Bodensee 35-mal komplett zu füllen.

Die Framstraße markiert somit auch das Ende der Transpolardrift. Als solche wird die von Wind und Ozean angetriebene Wanderung des arktischen Meereises aus den russischen Randmeeren des Arktischen Ozeans über den Nordpol bis vor die grönländische Ostküste bezeichnet. Die MOSAiC-Scholle hat für diesen mehr als 5200 Kilometer langen Weg etwa 610 Tage benötigt. Am vorletzten Julitag 2020 ist sie dann in mehrere Einzelteile zerbrochen. Reste jenes Eises, welches einst das erweiterte MOSAiC-Umfeld bildete, stecken



Für die Eisdickenmessungen geht das Flugzeug in den Tiefflug, sodass Pilot und Besatzung das Meereis bestens erkennen können. Während im Cockpit Zeit für einen Blick über das Meer bleibt (l.), überwachen die Forscher Thomas Krumpen, Jakob Belter und Cristina Sans i Coll (o., v. l. n. r.) per Kamera, ob sich der EM-Bird ordnungsgemäß aus seiner Halterung gelöst hat und perfekt über dem Meereis schwebt.

seitdem vor der Küste Ostgrönlands fest - eingeklemmt in einer Melange aus Eisbergen und auffallend dicken Meereisschollen, die vermutlich aus dem äußersten Norden Grönlands stammen.

Als Zielgerade der Transpolardrift ist die Framstraße für Meereisforschende ganz besonders interessant. „Jedes Detail des Meereises, das hier ankommt, verrät uns etwas über die Umweltbedingungen, denen es im Laufe seiner Drift durch die zentrale Arktis ausgesetzt war“, sagt Thomas Krumpen, wobei die Transpolardrift nicht die einzige Meereis-Autobahn des Arktischen Ozeans ist. Unter außergewöhnlichen Windbedingungen über dem Nordpolarmeer gelangt auch Meereis aus dem westlichen Beaufortwirbel in die Framstraße. Dieses ist in der Regel etwas älter und dicker als das Eis aus den russischen Randmeeren und macht auf die Gesamteismenge des heraustreibenden Eises gerechnet einen Anteil von etwa 35 Prozent aus.

EIN PROGRAMM NAMENS ICEBIRD

Der überwiegende Teil des Eises in der Framstraße aber stammt aus der Laptevsee und der Ostsibirischen See und erlaubt den Meereisforschenden wichtige Einblicke in das Klimasystem der Arktis. Aus diesem Grund kehren Thomas Krumpen und seine Kollegen aus



Der Meereisdickensensor EM-Bird sieht wie ein Torpedo aus und wird vom Hubschrauber oder Flugzeugen an einem langen Seil hängend (Hubschrauber 20 Meter, Flugzeug 80 Meter) über das Eis geschleppt. Er schwebt dann in etwa 15 Meter Höhe über dem Eis.

der AWI-Meereisphysik seit fast 20 Jahren regelmäßig in die nördliche Framstraße zurück, um die Dicke des Meereises zwischen dem 80. und 86. Breitengrad Nord zu vermessen und seine Oberflächeneigenschaften zu dokumentieren.

Die Eisdicken-Messungen werden mit einem elektromagnetischen Sensor durchgeführt. Dieser heißt EM-Bird (übersetzt: elektromagnetischer Vogel) und funktioniert ähnlich wie ein Metalldetektor. Das Gerät baut um sich herum ein elektromagnetisches Feld auf und kann verschiedene Schichten im Untergrund anhand ihrer elektrischen Leitfähigkeit unterscheiden. Salzwasser zum Beispiel leitet sehr gut, Meereis dagegen kaum. Diesen starken Kontrast nutzen die Meereisphysiker, um die Höhe des Gerätes über der Eisunterseite zu bestimmen.

Bei den ersten Messungen vor fast 20 Jahren zogen die Wissenschaftler den Sensor noch in einem Schlitten hinter sich über das Meereis. Die gemessene Höhe über der Eisunterseite ergab also ziemlich direkt die Dicke des Meereises und der darauf liegenden Schneeschicht. Weil zu Fuß jedoch nur kleine Strecken vermessen werden konnten, fliegen die AWI-Meereisphysiker seit dem Jahr 2004 mit dem Hubschrauber oder Forschungsflugzeug über das Eis und schleppen den torpedoförmigen Sensor an einem langen Seil hängend

in etwa 15 Meter Höhe über das Eis - daher auch die Bezeichnung Bird (Vogel). Ein Laserabstandsmesser erfasst dabei die genaue Distanz zwischen Sensor und Eisoberfläche. Um die Meereisdicke zu ermitteln, reicht dann einfache Mathematik. Die Wissenschaftler lesen die Distanz des Sensors bis zur Eisunterseite aus und subtrahieren davon die Höhe des Messgerätes über dem Eis.

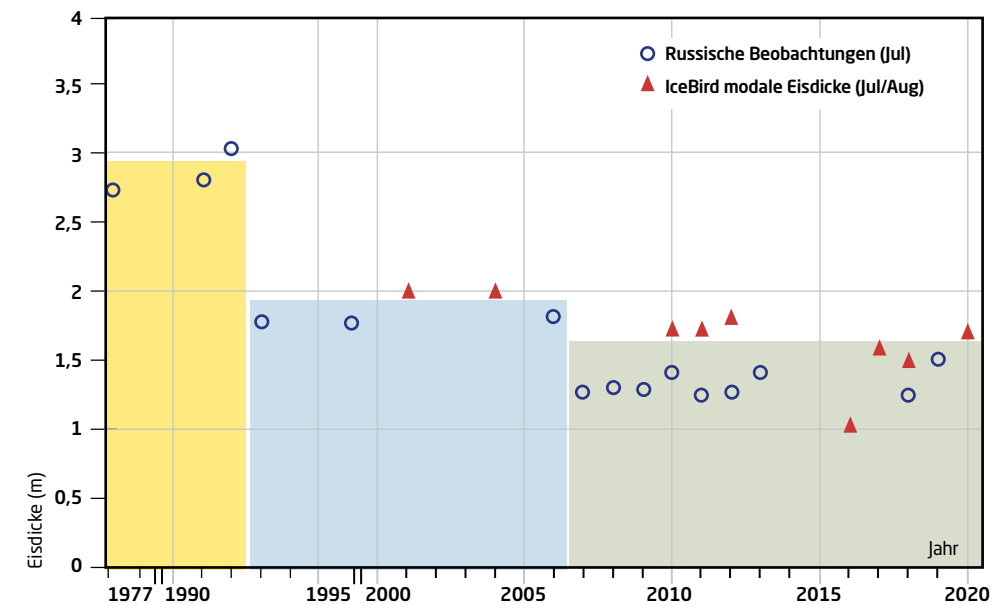
Zu Ehren dieser einzigartigen Messmethode haben die AWI-Meereisphysiker gleich ihr gesamtes luftgestütztes Meereis-Messprogramm in der Arktis nach dem Sensor benannt. Es heißt IceBird (Eisvogel), enthält mittlerweile Daten aus vielen Schlüsselregionen des Arktischen Ozeans und gilt als einer der weltweit wichtigsten Referenz-Datensätze zur Entwicklung der arktischen Meereisdecke.

ZWEI SPRÜNGE MARKIEREN DEN WANDEL

Die IceBird-Daten für die nördliche Framstraße zeigen im Detail vor allem eines - die kontinuierliche Abnahme aller Messgrößen. Betrug zum Beispiel die durchschnittliche Eisdicke im Jahr 2001 noch 2,6 Meter, sind es mittlerweile nur noch 2 Meter - ein Rückgang um 24 Prozent. Parallel dazu ist die am häufigsten gemessene Eisdicke (modale Eisdicke) von 2 Meter (2001) auf 1,5 Meter (2018) gesunken. „Jede einzelne Eisscholle hat heutzutage

Die stufenweise Abnahme der Eisdicke

Die Dicke des arktischen Meereises hat in den zurückliegenden 45 Jahren nicht gleichmäßig abgenommen, sondern in Sprüngen, wie dieser Vergleich russischer und deutscher Beobachtungsdaten zeigt. Farblich hervorgehoben sind dabei die drei Phasen, in denen die Meereisdicke jeweils annähernd gleichgeblieben ist.





viel weniger Zeit zu wachsen, weil das Meereis schneller treibt als früher. Im Vergleich zur Jahrtausendwende legen die dünneren Schollen die Strecke der Transpolardrift heute in fast der Hälfte der Zeit zurück“, erklärt Jakob Belter. War das Meereis am Anfang der IceBird-Messreihe fast drei Jahre alt, bevor es sich in den Nordatlantik verabschiedete, hat heutzutage ein Großteil der Schollen noch nicht mal den zweiten Geburtstag erlebt, wenn sie in die nördliche Framstraße einbiegen.

Interessanter Weise aber hat die Dicke des arktischen Meereises in den zurückliegenden fünf Jahrzehnten nicht gleichmäßig und damit geradlinig abgenommen. Stattdessen verlief die Entwicklung in zwei Sprüngen, wie ein Vergleich der IceBird-Daten mit einer länger zurückreichenden Messreihe russischer Polarforscher zeigt. Der erste Sprung erfolgte demnach im Zeitraum 1992/93: Damals fiel die Eisdicke in der zentralen Arktis plötzlich von durchschnittlich 3 Meter auf weniger als 2 Meter. Zwölf Jahre später (2005-2007) dokumentierten Meereisexperten aus verschiedenen Ländern dann den zweiten Sprung.



Die flugzeuggestützten Eisdickenmessungen ergänzen die regelmäßigen Dickenmessungen, welche im Verlauf der MOSAiC-Expedition direkt auf der Scholle oder aber in deren Umfeld gemacht wurden. Dazu zogen die Wissenschaftler den Sensor im Schlitten über das Eis (o.) oder aber hoben mit dem Bordhubschrauber ab, um das Messgerät an einem Seil hängend über das Eis zu fliegen (l.).

Die Eisdicke nahm um weitere 50 Zentimeter ab und liegt seitdem relativ konstant bei einem Wert zwischen 1,3 Meter und 1,5 Meter. „Wir vermuten, dass beide Sprünge durch grundlegende und vor allem andauernde Veränderungen im Klimasystem der Arktis stattgefunden hat, in dessen Zuge sich die Meereisbildung, der Meereis-Transport sowie die Altersstruktur des Eises nachhaltig verändert haben. Seitdem bildet sich das Eis später im Jahr, es wächst im Winter im geringeren Maße, es driftet schneller und verlässt die Arktis mittlerweile in einem Alter von weniger als zwei Jahren. Altes, mehrere Meter dickes Meereis gibt es in der Arktis heutzutage deutlich seltener als früher“, sagt Jakob Belter.

VERHÄNGNISVOLLE WÄRME AUS DER TIEFE

Zu alledem gibt es bereits Anzeichen für einen nächsten Sprung in der Eisdickenkurve: Im Sommer 2016 dokumentierten die AWI-Meereisphysiker bei ihren Messflügen in der nördlichen Framstraße überwiegend Eis, welches gerade mal ein Meter dick war (ohne Presseisrücken und Verformungen) - ein absoluter Negativrekord. Um herauszufinden,



AWI-Meereisphysiker Jakob Belter wartet auf dem Flughafen von Longyearbyen den Meereisdickensensor EM-Bird. Dieser hängt zu diesem Zeitpunkt in seiner speziellen Start- und Landehalterung, die am Rumpf des Forschungsflugzeuges POLAR 6 angebracht ist.

wieso das Eis bis zu 50 Zentimeter dünner war als in den Jahren zuvor, folgten die Forscher einem Drei-Stufen-Plan. Im ersten Schritt analysierten sie Satellitendaten, auf denen sie die Route des Eises bis zu seinem Ursprungsort in der Laptewsee zurückverfolgen konnten. Anschließend überprüften sie das Wetter entlang der Strecke. Könnte eine sommerliche Hitzewelle dem Eis von oben zugesetzt haben? Nein, die Atmosphärendaten zeigten für den Zeitraum von 2014 bis 2016 keine Auffälligkeiten.

Die Antwort musste also im Ozean liegen - und tatsächlich: Von Januar bis Mai 2015 dokumentierten Forschende der Universität Fairbanks Alaska im Meeresgebiet nördlich der Laptewsee außergewöhnlich hohe Wassertemperaturen. Die Wärme, so weiß man heute, war mit atlantischen Wassermassen aus der Tiefe aufgestiegen und hatte das winterliche Wachstum des jungen Meereises verlangsamt. „Anhand der Satellitendaten können wir belegen, dass das Eis, welches wir im Juli 2016 in der Framstraße vermessen haben, zuvor genau durch dieses außergewöhnlich warme Meeresgebiet vor der russischen Kontinentalkante gewandert ist“, erzählt Jakob Belter.

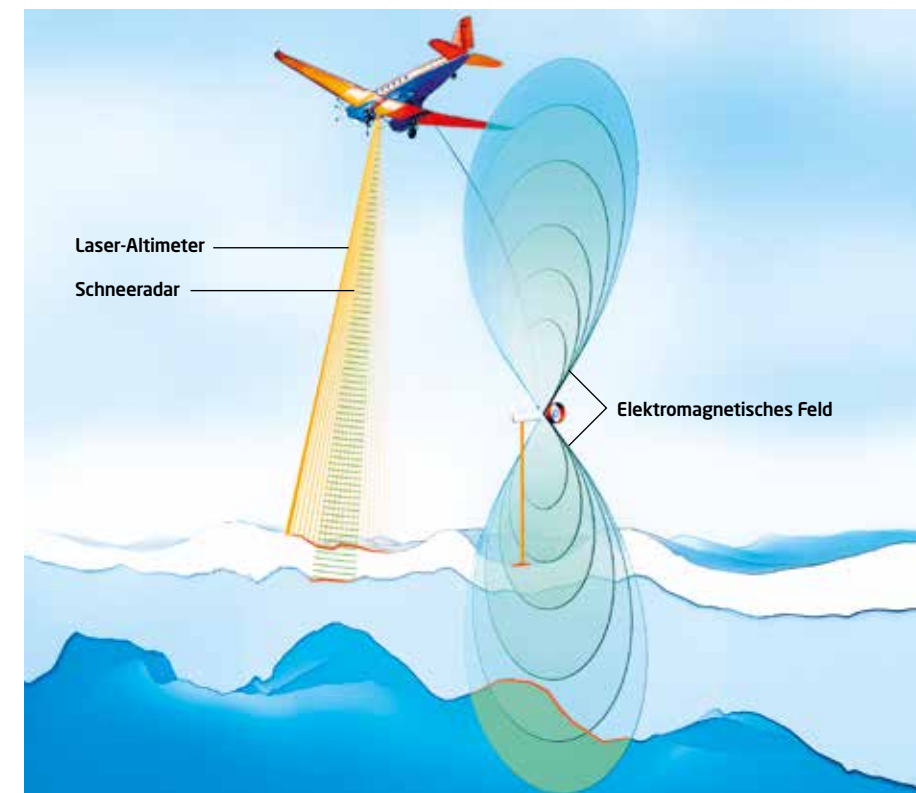
Aber bedeutete diese Erkenntnis automatisch, dass die geringe Dicke des Eises am Ende der Transpolardrift einzig und allein auf das warme Meer am Anfang zurückzuführen war? Hätten sich die Spuren der Wärme nicht über die Zeit verwachsen können? Um eine Antwort auf diese Fragen zu finden, simulierte der junge Wissenschaftler das Wachstum des

Eises in einem einfachen Meereismodell. Dabei berechnet der Computer anhand von vorgegebenen Meeres- und Atmosphärendaten, wie dick das Eis theoretisch werden müsste. „Bei dieser Modellberechnung gehen wir davon aus, dass die Wärmezufuhr von unten, also aus dem Meer, konstant ist und das Eis nur aufgrund der kalten Atmosphäre wächst“, erklärt Jakob Belter. „Beim Blick auf die Ergebnisse aber wurde schnell klar, dass unser Modell die überdurchschnittlich geringe Eisdicke von 2016 nicht abbilden konnte - das heißt, unsere Konstante für den Wärmefluss von unten war falsch. Gerade am Anfang der Transpolardrift muss das Meer demzufolge deutlich mehr Wärme beigetragen haben, als wir am Anfang angenommen haben“, so der Wissenschaftler.

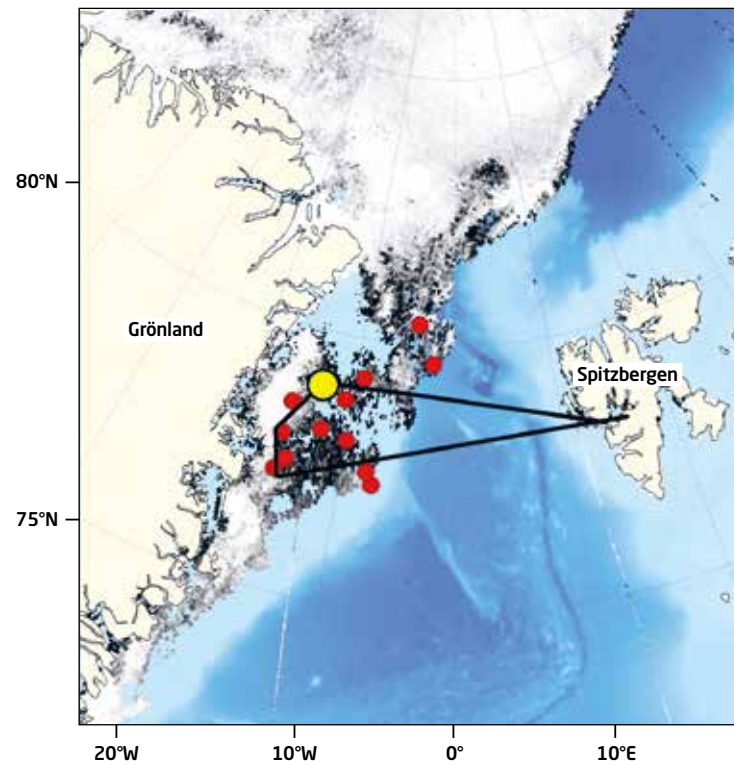
Wie viel mehr Wärme, lässt sich nur erahnen. „Bei unserer ersten Rechnung sind wir von einem Wärmefluss von 2 Watt pro Quadratmeter Eisfläche ausgegangen. Anschließend haben wir den Wert auf 25 Watt gesetzt und die Wärmezufuhr somit mehr als verzweif-

Vier auf einen Streich

Mit seinem Schneeradar, dem Höhenaltimeter und dem EM-Bird erfasst das Forschungsflugzeug vier Parameter, aus denen sich die genaue Meereisdicke errechnen lässt: die Höhe der Schneedecke, den Abstand des Flugzeuges zur Eisoberfläche sowie die Abstände des EM-Birds zur Eisober- und Unterseite.



Auf der Zielgeraden



Anfang September 2020 war die MOSAiC-Scholle in mehrere Teile zerbrochen und das Eis aus ihrem Umfeld hatte sich weit über die Framstraße verteilt. Die roten Punkte markieren Meereisbojen, die zu Beginn der Expedition im Umfeld der Scholle ausgebracht worden waren. Der gelbe Punkt ist die Position des norwegischen Forschungseisbrechers Kronprins Haakon, den POLAR 6 bei einem ihrer drei IceBird-Messflüge überflogen hat. Die schwarze Linie zeigt die Route dieses Fluges.

facht. Die Modellergebnisse gehen nun in die richtige Richtung, sie bilden allerdings noch immer nicht die in der nördlichen Framstraße gemessenen Eisdickenwerte ab. Wir schlussfolgern daraus, dass die „Meereshitzewelle“ im Winter 2014/15 ein ziemlich starkes Ereignis gewesen sein muss, dessen Auswirkungen auf das Dickenwachstum des Meereises bis zum Schluss nicht wieder ausgeglichen werden konnten“, erläutert der Wissenschaftler. Und es blieb nicht das einzige Wärmeextrem-Ereignis, wie neue Forschungsergebnisse zeigen. Im Winter 2017/18 dokumentierten die Messgeräte der US-amerikanischen Ozeanographen erneut aufsteigende Wärme im östlichen Teil des Arktischen Ozeans. Atlantisches Wasser, welches bis zu 1,5 Grad Celsius warm sein kann und bislang in Tiefen von 150 bis 900 Metern zirkulierte, stieg in diesem Zeitraum nachweislich bis in 80 Meter Tiefe auf. Unter solchen Umständen verändert sich der Wärmeaustausch zwischen den arktischen Wassermassen. Wie 2014/15 geschehen, gelangt dann auch im Winter Wärme aus der Tiefe bis an die Meeresoberfläche, schmilzt das Eis von unten oder aber verlangsamt dessen Wachstum. Die Folgen dieses Angriffs sind dann selbst ein Jahr später noch nachweisbar, wie die IceBird-Messungen aus dem Jahr 2016 eindrucksvoll belegen. Finden sich in den IceBird-Daten aus den zurückliegenden Jahren auch Hinweise auf weitere Wärmeattacken aus der Tiefe? Jakob Belter: „Nein, bislang deutet nichts darauf hin.“



Meereis aus dem ehemaligen Umfeld der MOSAiC-Eisscholle treibt im September 2020 durch den nördlichen Teil der Framstraße Richtung Süden, wo es wenige Wochen später schmelzen wird.

Das heißt jedoch nicht, dass es diesen Wärmeeinfluss auf das Meereis nicht gegeben hat. Von unseren Kollegen aus Alaska wissen wir, dass in den zurückliegenden Jahren weitere Meereshitzewellen im östlichen Teil des Arktischen Ozeans aufgetreten sind. Diese aber haben anscheinend nicht jenes Eis getroffen, welches wir ein Jahr später stromabwärts in der Framstraße vermessen haben. Das ist uns bisher tatsächlich nur in 2016 gelungen.“

MOSAIC-SCHOLLE: BIS ZUM SCHLUSS EINE REPRÄSENTATIVE EISFLÄCHE

Auch das Eis aus dem erweiterten MOSAiC-Umfeld ist anscheinend von extremer Wärme aus den Tiefen des Arktischen Ozeans verschont geblieben. „Bis zu ihrem Zerfall am 30. Juli 2020 wies die MOSAiC-Eisscholle eine modale Dicke von 1,7 Metern auf. Und selbst bei unserem Überflug im September waren die Überreste dieses großen Eisfeldes noch immer 0,9 bis 1 Meter dick, was uns angesichts des späten Zeitpunktes im Jahr fast schon überrascht hat“, sagt Thomas Krumpen.

Diese Ergebnisse ließen alle Teilnehmenden der MOSAiC-Expedition erleichtert durchatmen. „Wir können jetzt mit Sicherheit sagen, dass die MOSAiC-Scholle bis zu ihrem Zerfall ein repräsentatives Abbild des Meereises in dieser Region darstellte“, sagt Thomas Krumpen und fügt hinzu: „Diese Erkenntnis macht Hoffnung, dass auch die vielen Untersuchungen, welche im Zuge der Expedition durchgeführt wurden, repräsentative Ergebnisse liefern und die Umweltbedingungen in der zentralen Arktis so genau wie möglich widerspiegeln. Das ist zum Abschluss dieser einzigartigen Expedition eine wirklich gute Nachricht.“ ■

Impressum

HERAUSGEBER:**REKLIM – Helmholtz-Verbund Regionale
Klimaänderungen und Mensch**

REKLIM-Koordinationsstelle Alfred-Wegener-Institut,
Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung
Am Handelshafen 12 • 27570 Bremerhaven

REDAKTIONELLE LEITUNG

Klaus Grosfeld, Renate Treffeisen, Sina Löschke

TEXTE / BILDREDAKTION

Sina Löschke (schneehohl.net)

DATENAUFBEREITUNG

Annekathrin Jäkel

DESIGN UND LAYOUT

Melanie Wolter (frauwlter.de)

WISSENSCHAFTLICHE BERATUNG

Luisa von Albedyll, Stefanie Arndt, Jakob Belter,
Gerit Birnbaum, Sandro Dahlke, Christian Haas,
Stefan Hendricks, Clara Hoppe, Mario Hoppmann,
Christian Katlein, Daniela Krampe, Thomas Krumpfen,
Marcel Nicolaus, Janin Schaffer, Anja Sommerfeld,
Gunnar Spreen

REDAKTIONELLER STAND

November 2020

ISBN-Nr.: 978-3-9822680-1-9

HEFTBESTELLUNG

Die gesammelten DriftStories können kostenlos
bestellt werden. Bestellungen senden Sie bitte
an die REKLIM-Koordinationsstelle
(E-Mail: info@reklim.de). Eine PDF des Magazins steht
unter reklim.de zum Herunterladen zur Verfügung.

DRUCK

BerlinDruck GmbH + Co KG

Oskar-Schulze-Straße 12 • 28832 Achim

Die Publikation wurde klimaneutral gedruckt auf
FSC®-zertifiziertem Recyclingpapier, welches zu 100 Pro-
zent aus Altpapier hergestellt wurde. Für den Druck wur-
den ausschließlich mineralölfreie Farben verwendet.

Die DriftStories wurden initiiert vom
Helmholtz-Verbund Regionale Klimaänderungen
und Mensch (REKLIM) – einem Zusammenschluss
von neun Forschungszentren der
Helmholtz-Gemeinschaft. Mehr Informationen
finden Sie im Netz unter www.reklim.de



Bildnachweis

Titel und Umschlag: Melanie Wolter

Vorsatz: S. 2-3: Sebastian Grote / Alfred-Wegener-Institut

Inhaltsverzeichnis: S. 4: Stefan Hendricks / Alfred-Wegener-Institut

Ausgangspunkt einer Jahrhundertreise: S. 6-11: Esther Horvath / Alfred-
Wegener-Institut; S. 12: Lukas Piotrowski; S. 14: ESA / Drift + Noise; S. 15:
meereisportal.de; S. 16 o.: meereisportal.de; m. / u. NSIDC; S. 19 o.: meereisportal.de;
u. l.: Jarkko J / Flickr CC BY-NC 2.0; u. r.: Christopher Michel / Flickr CC BY 2.0

DS-01: Ermittlungen auf viel zu dünnem Eis: S. 20: Jan Rohde / Alfred-Wegener-
Institut; S. 22: Esther Horvath / Alfred-Wegener-Institut; S. 23: Mario Hoppmann /
Alfred-Wegener-Institut; S. 24: Esther Horvath / Alfred-Wegener-Institut;
S. 24 alle: Thomas Krumpfen / Alfred-Wegener-Institut

DS-02: Für einen schärferen Blick aus dem All: S. 26-30: Stefan Hendricks /
Alfred-Wegener-Institut; S. 32: Gunnar Spreen / Universität Bremen; S. 33:
meereisportal.de / Dreamstime: Mr Vettore und Roywylam

DS-03: Beben und Barrikaden: S. 34: Michael Gutsche / Alfred-Wegener-Institut;
S. 36: Stefan Hendricks / Alfred-Wegener-Institut; S. 37: Kerstin Rolfs /
Alfred-Wegener-Institut; S. 38: Stefan Hendricks / Alfred-Wegener-Institut;
S. 39 o.: Syed Mubashshir Ali; u.: Luisa von Albedyll / Alfred-Wegener-Institut;
S. 40: Michael Gutsche / Alfred-Wegener-Institut; S. 41: Manuel Ernst /
Alfred-Wegener-Institut (CC-BY 4.0)

DS-04: Glitzernde Wolken unter dem Eis: S. 42 o.: Marcel Nicolaus / Alfred-
Wegener-Institut; u.: BEAST / AWI-Meereisgruppe / Alfred-Wegener-Institut;
S. 44: Michael Gutsche / Alfred-Wegener-Institut (CC BY 4.0);

S. 45: Christian Katlein privat; S. 46: Esther Horvath / Alfred-Wegener-Institut;
S. 47: BEAST / AWI-Meereisgruppe / Alfred-Wegener-Institut

DS-05: Ein heißer Streifen Eis: S. 48: Folke Mehrrens / Alfred-Wegener-Institut;
S. 50: Lukas Piotrowski; S. 51: Esther Horvath / Alfred-Wegener-Institut;
S. 52 o. l.: Christian R. Rohleder / DWD; o. r.: Marcus Huntemann u. Linda Thielke /
Alfred-Wegener-Institut

DS-06: Schnee, die unbekannte Größe: S. 54: Michael Gutsche / Alfred-Wegener-
Institut; S. 56: Esther Horvath / Alfred-Wegener-Institut; S. 57 o.:
Stefan Hendricks / Alfred-Wegener-Institut; r.: Stefanie Arndt / Alfred-
Wegener-Institut (CC BY 4.0); S. 58 o.: Esther Horvath / Alfred-Wegener-Institut
(CC BY 4.0); u.: Daniela Krampe / Alfred-Wegener-Institut; S. 59: Stefan Hendricks /
Alfred-Wegener-Institut; S. 62: Ilkka Matero; S. 63: Steffen Graupner

DS-07: Das Omen des ersten Schneeballs: S. 64: Markus Rex / Alfred-Wegener-
Institut; S. 66: Lianna Nixon / Alfred-Wegener-Institut (CC-BY 4.0); S. 67 o.:
Robert Ricker / Alfred-Wegener-Institut; u.: AWI-Meereisphysik; S. 68: Bennet
Juhls; Modified Copernicus Sentinel data [2020], scihub.copernicus.eu;
S. 69: Lianna Nixon / Alfred-Wegener-Institut; S. 70: Stefanie Arndt / Alfred-
Wegener-Institut; S. 71: Lianna Nixon / Alfred-Wegener-Institut

DS-08: Die vielen Gesichter der Kälte: S. 72: Michael Gutsche / Alfred-
Wegener-Institut; S. 74: Esther Horvath / Alfred-Wegener-Institut (CC-BY 4.0);
S. 75 o.: Julia Wenzel / DWD; r.: Mario Hoppmann / Alfred-Wegener-Institut;
S. 76: Sandro Dahlke / Alfred-Wegener-Institut; S. 77: Steffen Graupner; S. 78:
AWI-Meereisphysik; S. 79: Lukas Piotrowski; S. 80: Jan Rohde / Alfred-Wegener-
Institut; S. 81 o. l.: Esther Horvath / Alfred-Wegener-Institut; o. r.: Ružica Dadić;
S. 82: Folke Mehrrens / Alfred-Wegener-Institut; S. 83 o.: Christian Katlein,
ROV Beast (CC-BY 4.0); u.: Janin Schaffer, Sandra Tippenhauer / Alfred-Wegener-
Institut; S. 84: Michael Gutsche / Alfred-Wegener-Institut; S. 85: Ying-Chih Fang /
Alfred-Wegener-Institut (CC-BY 4.0)

DS-09: Algen in der Arktis: Nichts ist unmöglich: S. 86: Norman Kuring / NASA's
Ocean Color Web, using Landsat data from the U.S. Geological Survey; S. 88: Paolo
Verzone; S. 90: René Buergi / Alfred-Wegener-Institut; S. 91: Laura Wischniewski /
Alfred-Wegener-Institut; S. 92: Paola Itkin / NPI; S. 93: Oliver Müller / Alfred-
Wegener-Institut (CC-BY 4.0)

DS-10: Ein Wiedersehen am Ausgangstor der Arktis: S. 94-97: Esther Horvath /
Alfred-Wegener-Institut; S. 98: Jan Rohde / Alfred-Wegener-Institut (CC-BY 4.0);
S. 99: Jakob Belter / Alfred-Wegener-Institut; S. 100: Michael Gutsche / Alfred-
Wegener-Institut (CC-BY 4.0); S. 101: Lianna Nixon / Alfred-Wegener-Institut;
S. 102: Esther Horvath / Alfred-Wegener-Institut; S. 103: Martin Künsting /
Alfred-Wegener-Institut (CC-BY 4.0); S. 104: Thomas Krumpfen / Alfred-Wegener-
Institut; S. 105: Esther Horvath / Alfred-Wegener-Institut

Technik-Container: S. 60: Melanie Wolter

Impressum/Bildnachweis: S. 106: Michael Gutsche / Alfred-Wegener-Institut

