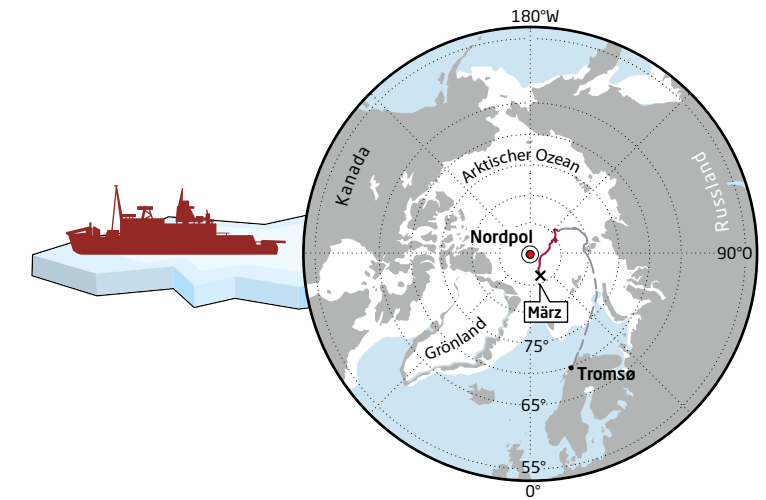


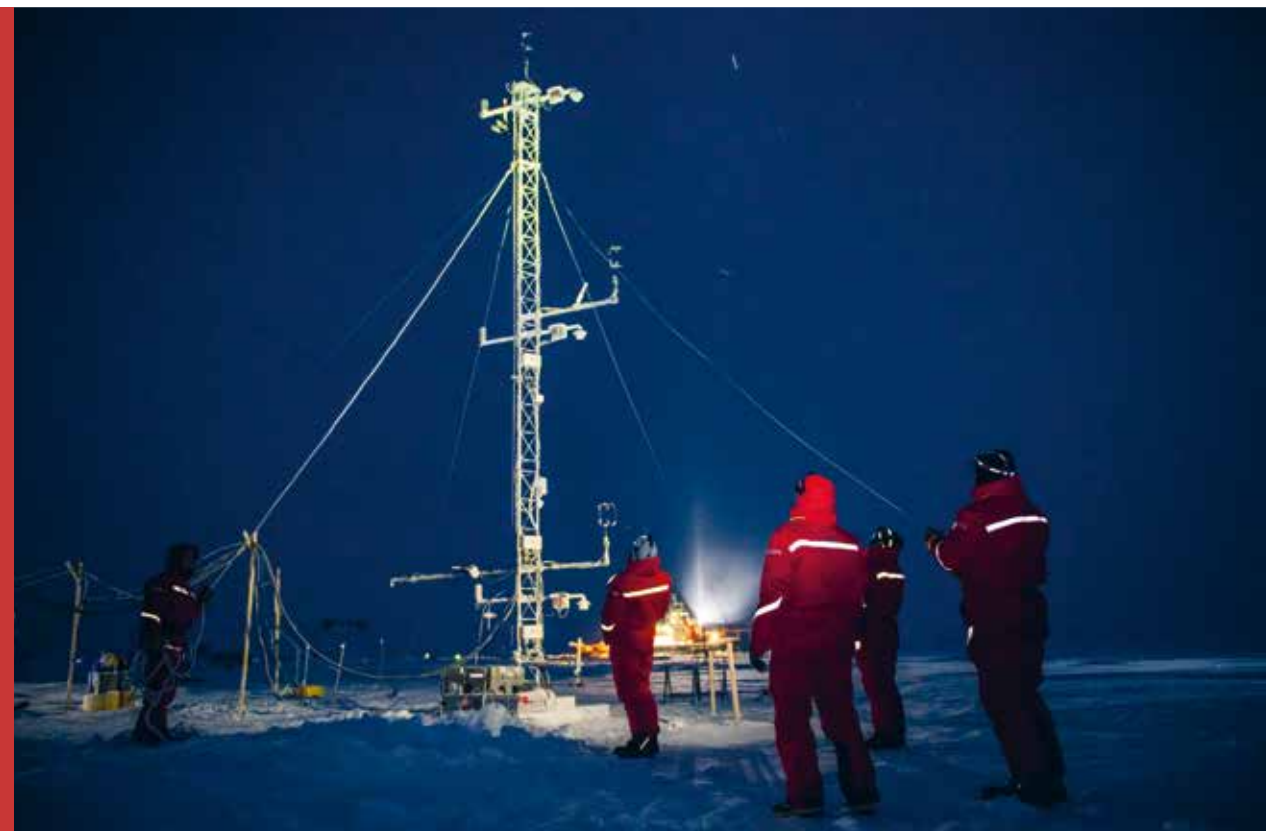
Diesen orangefarbenen Fesselballon nennen die Wissenschaftler „Miss Piggy“. Er steigt an einem Seil befestigt bis in eine Höhe von zwei Kilometer auf und wurde eingesetzt, um die Temperatur der unteren Luftschichten zu erfassen.



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 dienten 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 Wärme Flüsse 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.

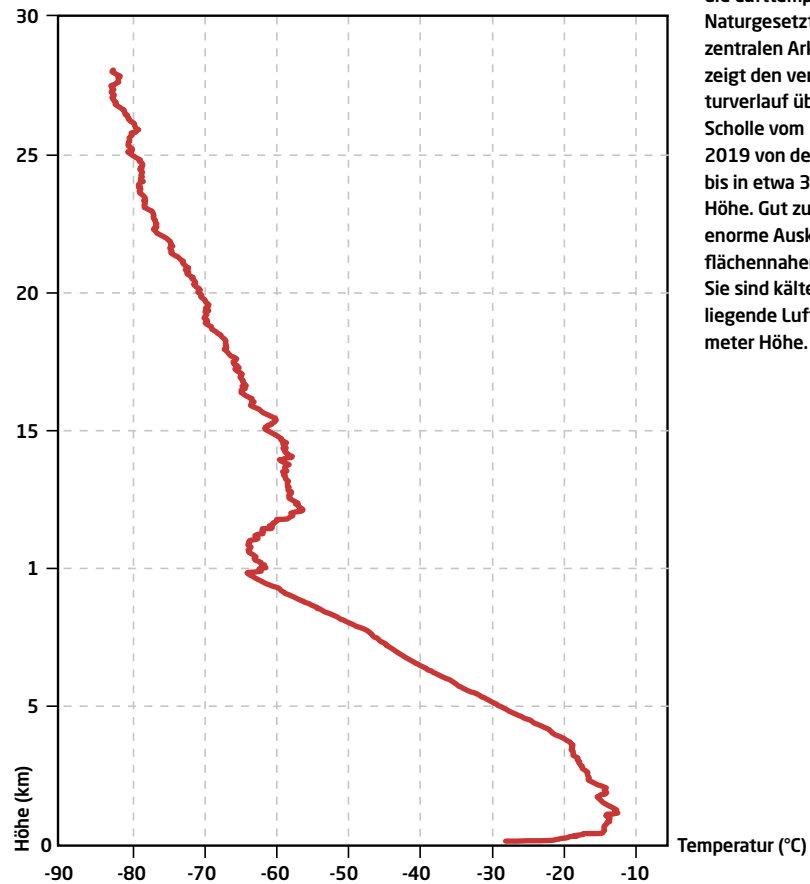
in etwa zehn Kilometer Höhe weniger als -60 Grad Celsius und in einer Höhe von mehr als 25 Kilometern stellenweise sogar weniger als -80 Grad Celsius. Der Temperaturunterschied zwischen den unteren Luftschichten und der Stratosphäre betrug demzufolge bis zu 60 Grad Celsius.

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.

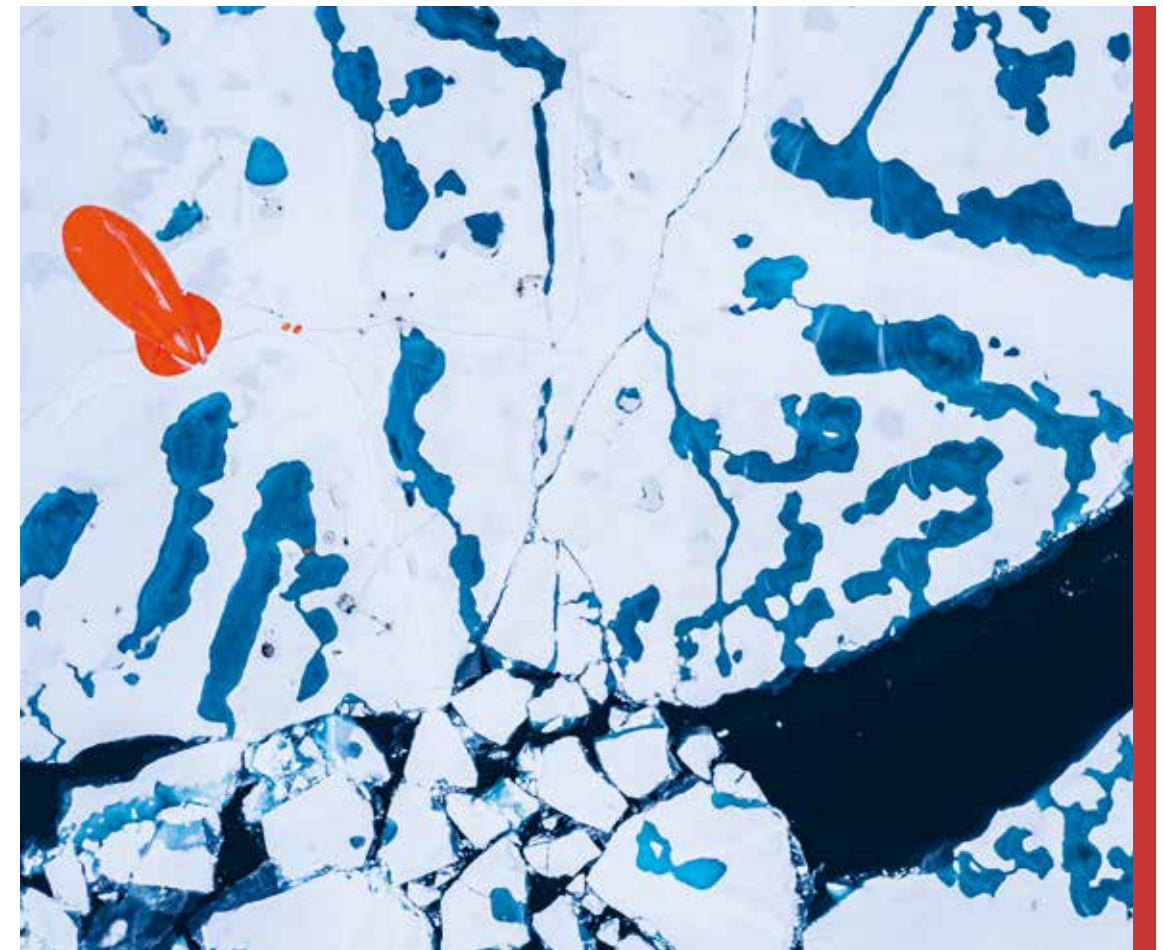
strahlen im Anschluss die Energie wieder Richtung Boden ab. Auf diese Weise erwärmen sie die unteren Luftschichten. Wolken machen hierbei wirklich einen Unterschied! War im MOSAiC-Winter der Himmel wolkenverhangen, betrug die Lufttemperatur auf dem Eis in der Regel um die -15 Grad Celsius. An wolkenlosen 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.

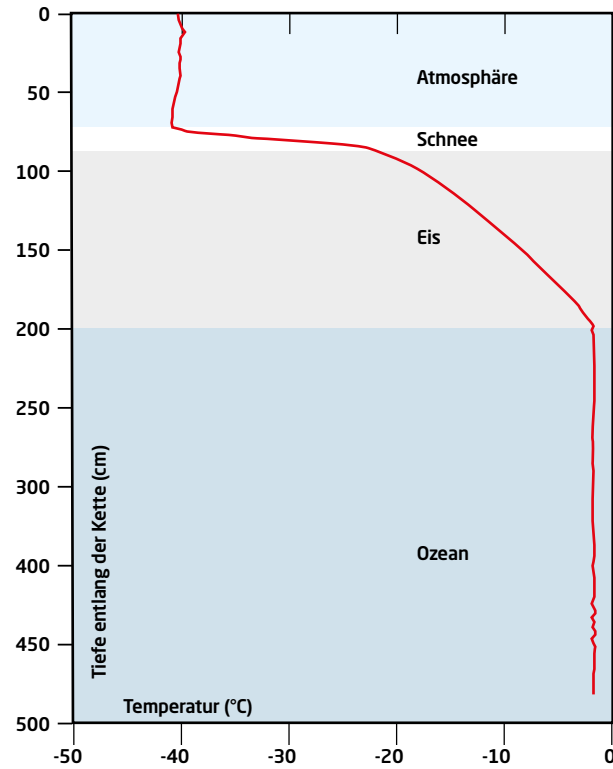
Dr. Anja Sommerfeld und Dr. Sandro Dahlke

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-



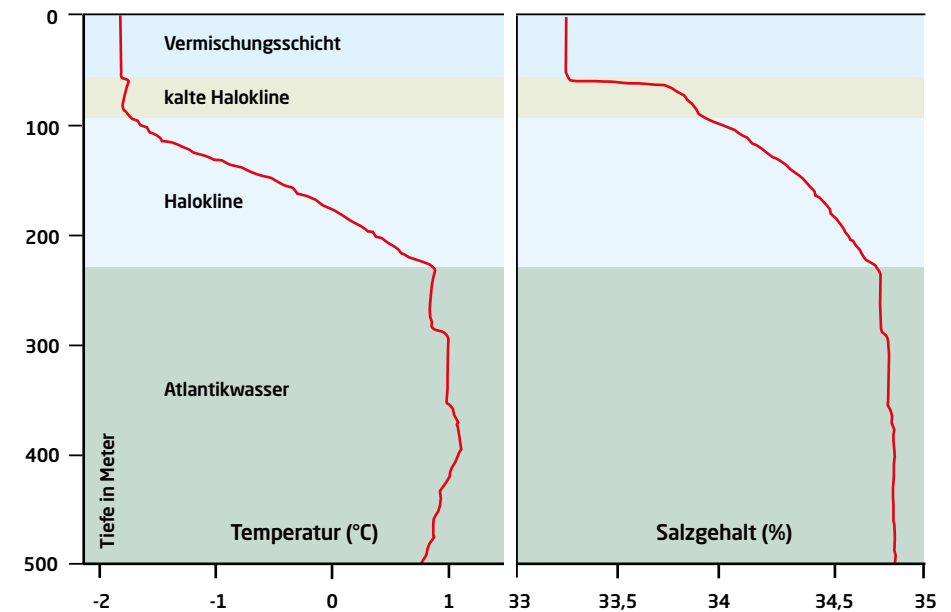
Als sich am Morgen des 23. Januar 2020 eine Rinne im Meereis bildet, greifen die Ozeanographen Dr. Volker Mohrholz und Dr. Benjamin Rabe zur Angel und lassen eine Mikroturbulenzsonde in die Tiefe. Die Sonde misst die Temperatur, den Salz- und Sauerstoffgehalt sowie Verwirbelungen des Wassers.



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

Leicht nach oben, schwer nach unten

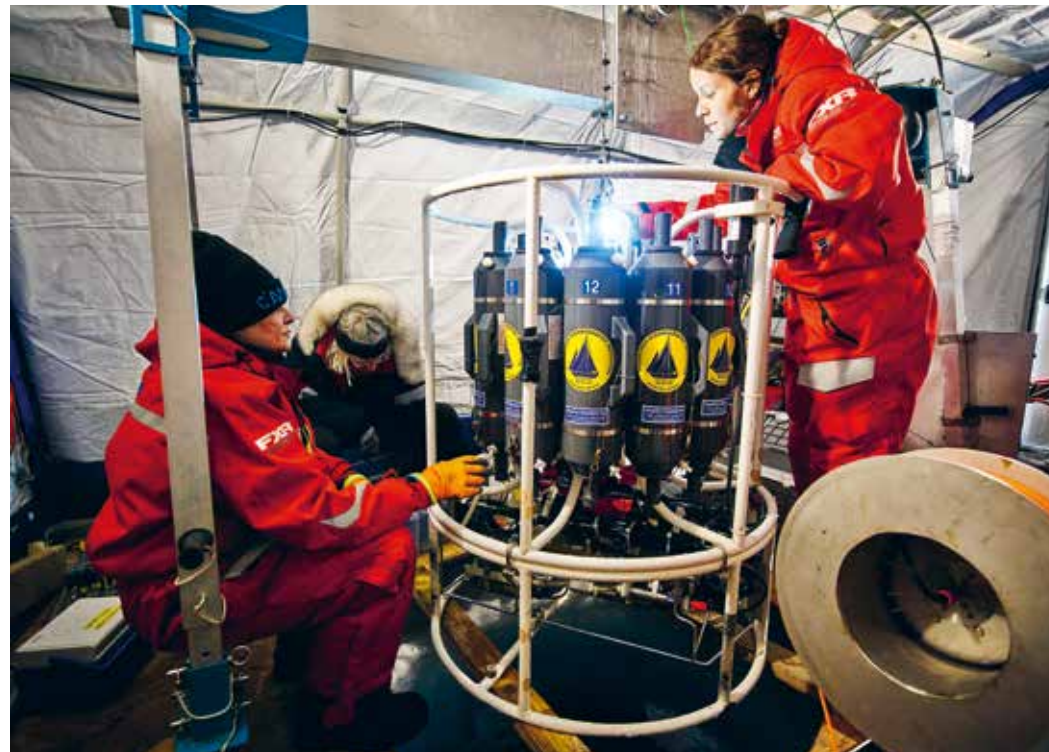
Die Temperatur und der Salzgehalt einer Wasserschicht entscheiden darüber, wie schwer das Wasser ist und bis in welche Tiefe es hinabsinkt. Dieses Temperatur- und Salzgehaltsprofil zeigt, wie klar die einzelnen Wassermassen unter der MOSAiC-Scholle voneinander zu unterscheiden sind.



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.

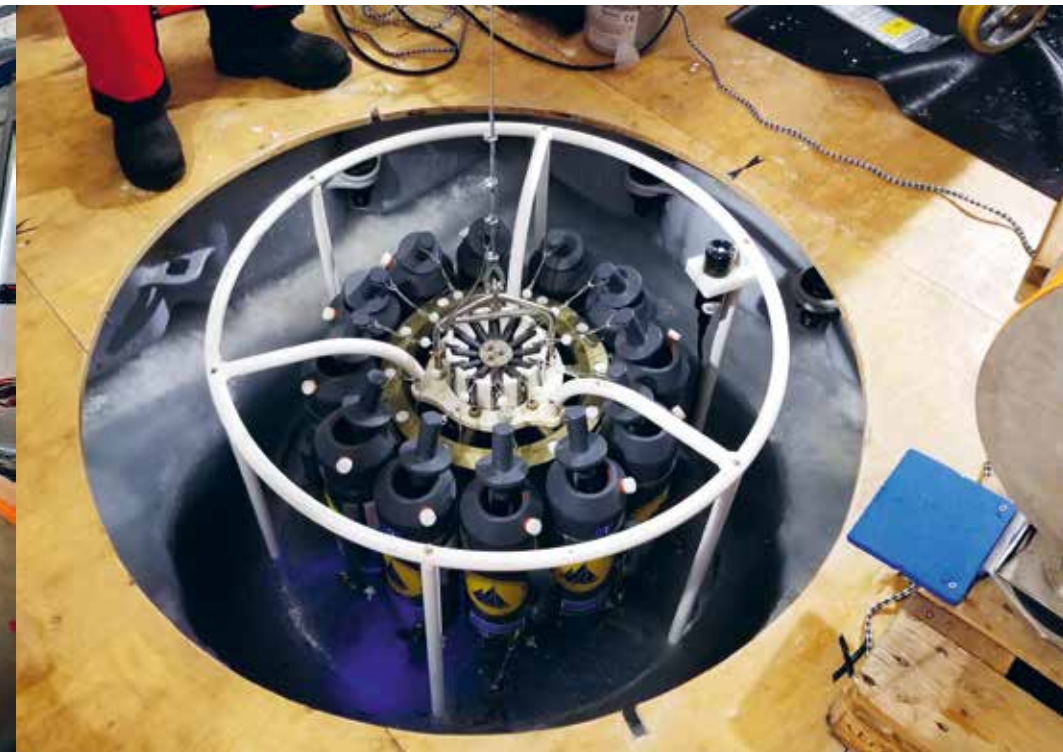
Theoretisch geht man bislang davon aus, dass die viele Salzlake aus dem Meereis die Schichtung der Wassermassen im zentralen Arktischen Ozean verstärkt - und zwar in einem solchen Ausmaß, dass es kaum Wirbel oder Turbulenzen gibt, die stark genug sind, um nennenswerte Mengen des wärmeren Atlantikwassers 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.