IM FOKUS

Alfred-Wegener-Institut // Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung



AUF DEN SPUREN DES WANDELS

Klimaforschung in den Polarregionen

ARKTIS
Der Hotspot des Planeten

ANTARKTIS
E-Mails vom Filchner-Schelfeis

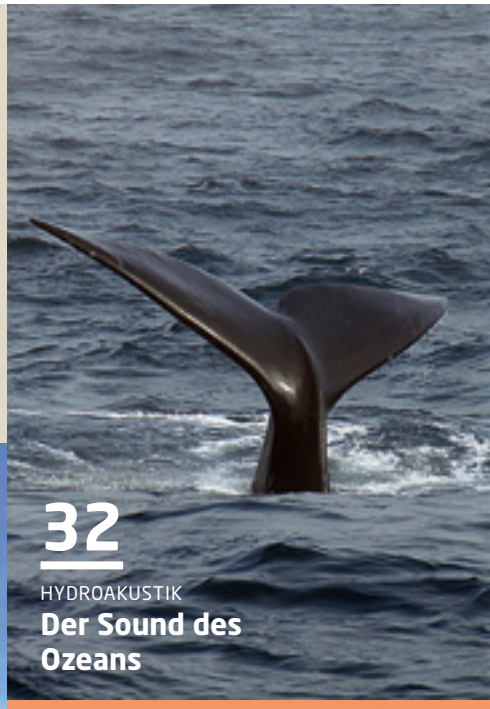
OZON
Viel mehr als nur UV-Schutz



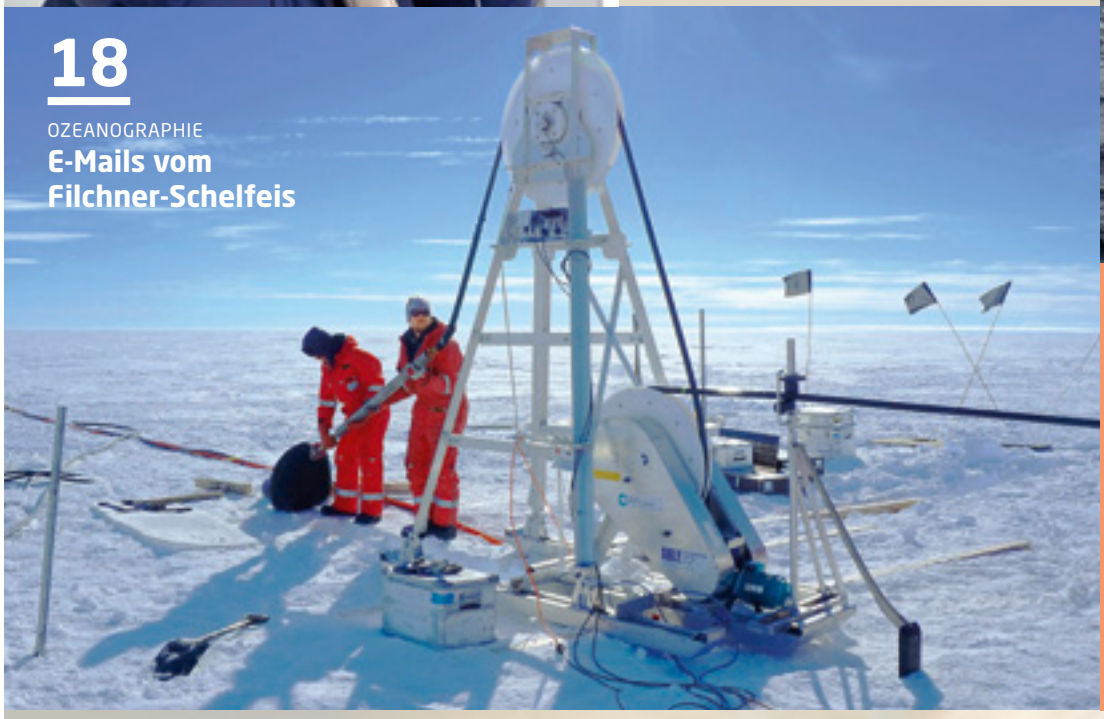




58
ATMOSPHÄRENFORSCHUNG
Die Ozon-Story



32
HYDROAKUSTIK
Der Sound des Ozeans



18
OZEANOGRAPHIE
E-Mails vom Filchner-Schelfeis



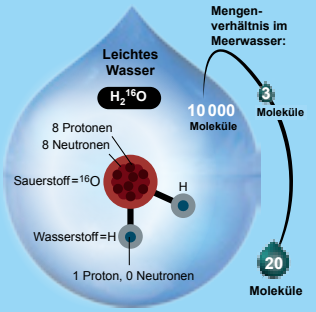
52
KLIMAMODELLIERUNG
Die Stärken des Rechnens



8
SCHWERPUNKTTHEMA
Hotspot Arktis – wenn das Eis verschwindet



64
MEEREISPHYSIK
Messungen aus der Vogelperspektive



78
INFOGRAFIK
Einblicke in das Klima der Vergangenheit

INHALT

6 EDITORIAL
Auf den Spuren des Wandels: Forschung an den Brennpunkten unseres Planeten

8 SCHWERPUNKTTHEMA
Hotspot Arktis – wenn das Eis verschwindet

18 OZEANOGRAPHIE
E-Mails vom Filchner-Schelfeis

26 MEEREISVORHERSAGE
Wenn zwei sich „streiten"…

28 KLIMAMODELLIERUNG
Stets die richtige Maschenweite

32 HYDROAKUSTIK
Der Sound des Ozeans

36 OZEANOGRAPHIE
Der Wärme-Pulsschlag des Nordatlantiks

42 OZEANOGRAPHIE
Wohin wandert der Rieseneisberg vom Larsen C-Schelfeis?

46 ATMOSPHÄRENFORSCHUNG
Per Anhalter in die Arktis

52 KLIMAMODELLIERUNG
Die Stärken des Rechnens

54 FERNERKUNDUNG
Die Lücken im Blick

58 ATMOSPHÄRENFORSCHUNG
Die Ozon-Story

64 MEEREISPHYSIK
Messungen aus der Vogelperspektive

72 FORSCHUNGSVERBUND
Den Klimawandel vor der Haustür verstehen

78 INFOGRAFIK
Einblicke in das Klima der Vergangenheit

80 MEERESSPIEGELANSTIEG
Eis weg - Land unter!

86 IMPRESSUM
BILDNACHWEISE

Kleine Wegweiser
Beim Anblick imposanter Eisberge oder Forschungsschiffe zu wissen, ob diese nun gerade im Arktischen Ozean oder im Südpolarmeer unterwegs sind, ist gar nicht so einfach. Deshalb geben wir eine Hilfestellung. Diese kleinen Symbole am Anfang eines jeden Beitrages verraten Ihnen, in welcher Polarregion die Protagonisten der Geschichte forschen. Der Eisbär steht für die Arktis, der Pinguin für die Antarktis.

AUF DEN SPUREN DES WANDELS

Forschung an den Brennpunkten unseres Planeten

Als Polarforscher haben wir das Glück, *in einzigartigen Naturräumen arbeiten zu dürfen. Die Arktis fesselt durch die rauen Gletscherfjorde Grönlands und Spitzbergens, durch Begegnungen mit wachsamen, elegant auf Eisschollen dahinschreitenden Eisbären und durch die scharfen Kontraste, die sich aus dem Zustrom warmen Wassers aus den Subtropen und den arktischen Kaltluftausbrüchen ergeben. Auf Antarktis-Expeditionen an Bord des Forschungseisbrechers Polarstern erleben wir die stürmische See der „Furious Fifties" und „Screaming Sixties" und die majestätische Stille des eisbedeckten Ozeans und der darin dahingleitenden Tafeleisberge in einer der vom Menschen unberührtesten Regionen unseres Planeten.*

Wie uns diese Faszination und unsere Neugierde antreiben, erfahren Sie in Auszügen in diesem Heft. Begleiten Sie uns auf Meereismessflügen in der Arktis, bohren Sie mit uns durch das zweitgrößte Schelfeis der Antarktis oder schauen Sie unseren Mathematikern dabei über die Schulter, wie sie neue Methoden für die Klimamodellierung entwickeln. Dabei werden Sie einen Eindruck davon gewinnen, wie vieler Puzzleteile es bedarf, um ein umfassendes Bild von den vielseitigen physikalischen Prozessen des Klimageschehens in den Polarregionen zu erhalten.

Die meisten unserer Geschichten haben eine Gemeinsamkeit: In fast allen Themengebieten arbeiten Forscherinnen und Forscher unterschiedlicher Fachrichtungen in internationalen Projekten zusammen, um die komplexen Zusammenhänge zu verstehen. Dabei bilden verlässliche Langzeitbeobachtungen das Fundament unserer Arbeit. Beispiele hierfür sind die täglichen Temperaturmessungen an unseren Forschungsstationen in der Arktis und Antarktis, die Beobachtungen der Meeresströmungen an unseren Tiefseeverankerungen in der Framstraße und im Weddellmeer, die Daten unserer Meereisbojen, welche durch das Südpolarmeer und das Nordpolarmeer treiben und die vielen Satellitendaten, ohne die moderne Klimaforschung heute nicht mehr vorstellbar wäre.

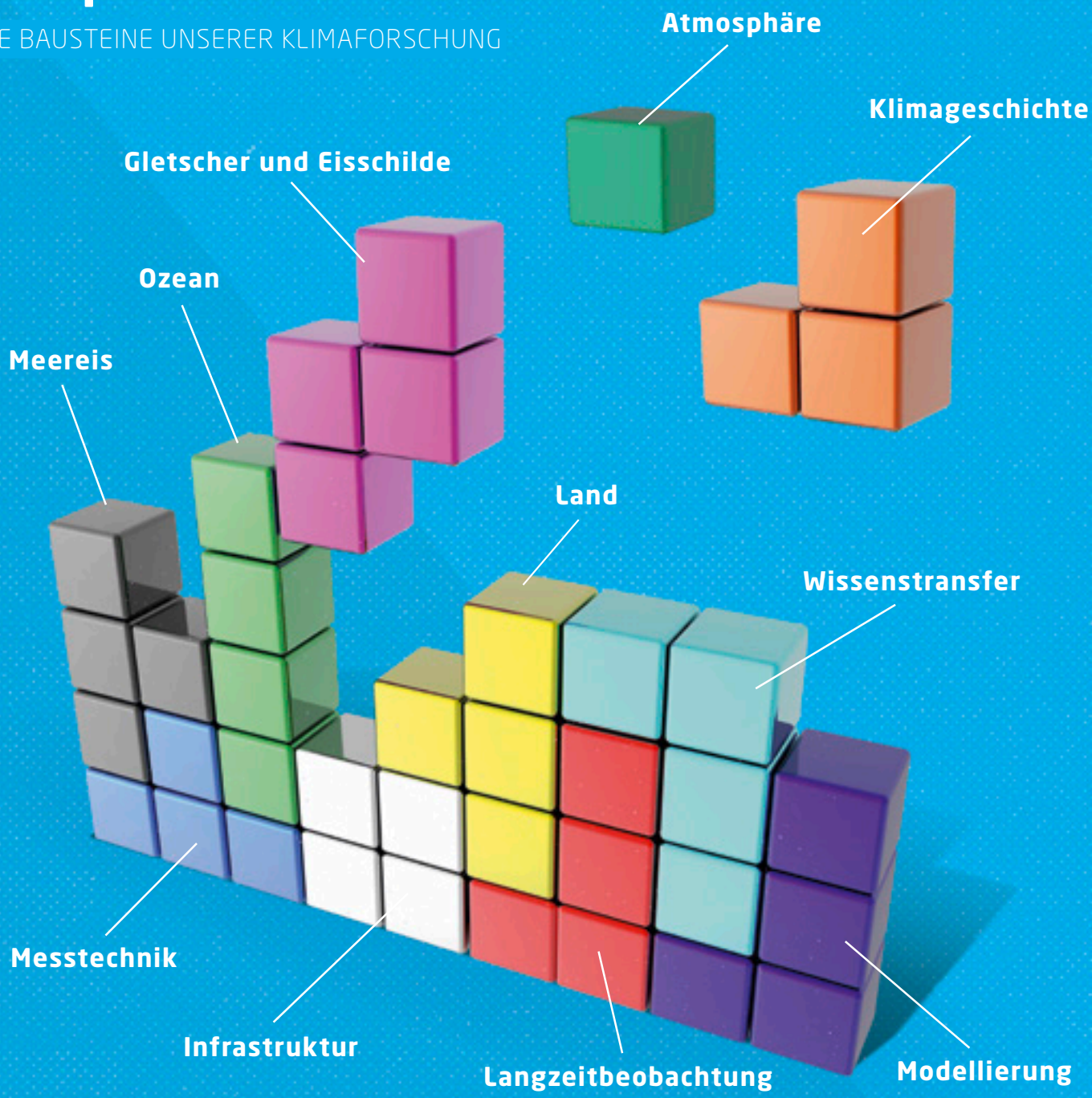
Ob Ozean, Eis, Atmosphäre oder Land: Wir stellen durch uns Engagement sicher, dass verlässliche Messdaten erhoben werden, die absolut kritisch für die Validierung unserer Klimamodelle sind und uns helfen, deren Vorhersagen stetig zu verbessern. Wer wie wir die aktuellen Veränderungen bewerten möchte, muss zudem in die Klimageschichte unseres Planeten schauen. Die Datenreihen dafür reichen für den Ozean bis zu 65 Millionen Jahre zurück, jene für das Inlandeis der Antarktis bis zu 800 000 Jahre. Und dort wo Messdaten fehlen, sorgen ausgefeilte Klimamodelle für eine größere Blickschärfe. Fest steht: Die Polarregionen verändern sich unter dem Einfluss des Klimawandels. Drastische Anzeichen dafür, wie der Rückgang des Meereises, treten zuerst und im besonderen Maße in der Arktis auf – und teilweise auch schon in der Antarktis. Unser Auftrag lautet deshalb, an diesen Brennpunkten die Spuren und die Geschwindigkeit des Wandels zu dokumentieren, dessen Ursachen zu ergründen und sein mögliches zukünftiges Ausmaß einzuschätzen. Eine Verantwortung, welche wir Klimawissenschaftlerinnen und -wissenschaftler am Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung, ganz besonders Rechnung tragen. Denn oberste Leitlinie unserer Arbeit ist das Anliegen, welches die Vereinten Nationen im Kapitel zum Ziel 13 ihrer Nachhaltigkeitsagenda formuliert haben: Den Klimawandel und seine Folgen für alle Menschen dieser Welt zu verstehen und einzudämmen.

Nur auf der Basis fundierten Wissens können Politik und Gesellschaft zu Lösungen dieses globalen Problems gelangen. Deshalb gehört es auch zu unseren Aufgaben, unser Wissen in die Gesellschaft zu tragen und mit ihr in einen Dialog zu treten. Auch hier gehen wir neue Wege. Unser Klimabüro für Polargebiete und Meeresspiegelanstieg arbeitet gemeinsam mit der Geschäftsstelle des Helmholtz-Forschungsverbundes Regionale Klimaänderungen (REKLIM) an der Entwicklung innovativer Formate. Zu diesen zählt unser erfolgreiches Web-Angebot meereisportal.de. Aber auch neue Veranstaltungsformate, die deutschlandweit Aufmerksamkeit erregen und das Thema Klimawandel in das Bewusstsein der Menschen rücken. Bitte fühlen Sie sich eingeladen, mit uns zu diskutieren. Zunächst aber wünschen wir Ihnen viel Spaß bei der Lektüre.

Prof. Dr. Torsten Kanzow
Vorsitzender des Fachbereichs Klimawissenschaften am Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung

Kompetenz hoch elf

DIE BAUSTEINE UNSERER KLIMAFORSCHUNG



Spitzenforschung wird heutzutage von Frauen und Männern gleichermaßen betrieben, auch am AWI. Der einfachen Lesbarkeit wegen aber nennen wir sie doch vielerorts geschlechtsübergreifend „Wissenschaftler".



DIE GLETSCHERZUNGEN SCHRUMPFEN

Die Gletscher Spitzbergens teilen das Schicksal der Eisströme Grönlands und Nordamerikas: Sie verlieren im Sommer mehr Eis als im Winter durch Schneefall hinzukommt. Ausgelöst wird dieser Eisverlust durch steigende Luft- und Wassertemperaturen. Sie forcieren die Schmelze an der Ober- und Unterseite der Eiszungen.

HOTSPOT ARKTIS
- wenn das Eis verschwindet

Der Trend ist eindeutig: Die Arktis erwärmt sich mehr als doppelt so schnell wie der Rest der Erde. Und damit schrumpft auch das Eis. Forscher des AWI wollen die Ursachen verstehen und auch herausfinden, wie sich die Situation in der Arktis auf unsere Breiten auswirkt. Mit Klimamodellen und Expeditionen ins Eis versuchen sie, in die Zukunft zu blicken.



DIE INSEL AUS EIS ZERFÄLLT

Die Steilküste der kanadischen Arktisinsel Herschel Island besteht nur aus Bodeneis und einer dünnen Humusschicht. AWI-Forscher untersuchen seit zehn Jahren, in welchem Tempo der Dauerfrostboden der Insel taut und der Arktische Ozean Meter für Meter des Küstenstreifens davonspült.



D

Text: **TIM SCHRÖDER**



Der Klimawandel ist in vollem Gang. Das ist in kaum einer Region so deutlich spürbar, wie in der Arktis, denn sie erwärmt sich mehr als doppelt so schnell wie der Rest des Planeten. Seit mehr als 20 Jahren messen Forscher des AWI an ihrer Forschungsstation auf Spitzbergen täglich die Lufttemperatur. Ihre Daten lassen aufhorchen. Seit dem Jahr 1995 ist die Lufttemperatur auf der arktischen Insel im Mittel pro Jahrzehnt um 1,4 Grad Celsius gestiegen. Vor allem die Winter sind wärmer geworden: Ihre Durchschnittstemperatur hat im selben Zeitraum sogar um 3,1 Grad Celsius zugenommen.

Auch aus dem Weltall ist die Erwärmung der Arktis inzwischen deutlich sichtbar. Daten der Landsat-Satelliten zeigen, dass sich Pflanzen immer weiter nach Norden ausbreiten. Im Vergleich zum Jahr 1984 erscheinen heute knapp 30 Prozent der Fläche Westalaskas, der kanadischen Nordküste und insbesondere die Fläche Quebecs und Labradors deutlich grüner, weil in diesen Regionen jetzt Arten wachsen, die dort früher nicht überleben konnten. Die deutlichsten Farbveränderungen gibt es jedoch auf dem Arktischen Ozean. Dessen Meereisdecke ist im zurückliegenden Jahrzehnt so umfassend geschrumpft, dass Zeitungen und Newsportale auf der ganzen Welt inzwischen regelmäßig über das schwindende Eis berichten.

Die Meereisdecke schrumpft

Die Klimaforscher des AWI befassen sich intensiv mit dieser Abnahme des Meereises. Einer von ihnen ist Prof. Christian Haas, der das arktische Eis seit mehr als einem Vierteljahrhundert kennt. Im Jahr 1991 stand er als Student zum ersten Mal auf den Eisschollen der Arktis. Seine Aufgabe war es, die Eisdicke mit Bohrstangen zu messen. „Wir haben damals immer gehofft, dass das Eis nicht mehr als zwei Meter dick ist", erinnert sich der AWI-Meereisphysiker. „Eine Bohrstange ist nur einen Meter lang. Nach jedem Meter muss man den Bohrer herausziehen und ein neues Meter-Stück hinzufügen. Das ist in der Kälte ziemlich anstrengend. Wir waren froh, wenn wir keinen dritten Meter brauchten."

Heute muss Christian Haas bei der Eisdickenmessung nur noch selten einen zweiten oder dritten Bohrmeter in die Hand nehmen, denn das Eis ist in den vergangenen Jahrzehnten deutlich dünner geworden - mit hoher Wahrscheinlichkeit auch durch Beiträge der Menschen zum Klimawandel. „Oft messen wir nur noch gut einen Meter", sagt er. Insgesamt sei das Volumen des arktischen Meereises, das sich aus der Fläche und der Dicke der Eismassen errechnet, seit Anfang der 1980er Jahre durchschnittlich um mehr als neun Prozent pro Dekade zurückgegangenen.

Im Sommer ist der Rückgang am stärksten. Dann beschleunigt sich das Schmelzen durch die Absorption von Sonnenstrahlung in Schmelztümpeln und Rinnen, dem sogenannten Eis-Albedo-Rückkopplungsprozess. „Wenn sich dieser Trend fortsetzt, ist in 30 bis 50 Jahren im Spätsommer gar kein Eis mehr in der Arktis", sagt Christian Haas. Allerdings geht er davon aus, dass sich das Meereis im Winter wieder neu bilden wird. Denn während der Polarnacht gibt es keinen Wärmeeintrag durch Sonnenstrahlung, sodass neues Eis wachsen kann. Doch werden diese Eismassen früher im Jahr schmelzen. Und erst viel später im Herbst wird sich neues Eis bilden. Das führt zu geringeren Eismengen.

Warme Winter in der Arktis - ein Zukunftstrend?

Warum die Eisdecke so stark schrumpft, ist nicht ganz klar. Denn sie hängt nicht nur von den Lufttemperaturen in den unteren Schichten der Atmosphäre ab, sondern auch von den Wassertemperaturen und Meeresströmungen beziehungsweise der Geschwindigkeit, mit der das Meereis östlich Grönlands aus der Arktis nach Süden treibt. Daher darf man die extreme Eisschmelze in der Arktis, die sich in den Sommern 2007, 2012 oder auch 2016 ereignet hat, nicht unbedingt als den neuen Normalfall ansehen. In jenen Jahren trieben Luftströmungen ungewöhnlich viel Wärme aus den mittleren Breiten in die Arktis, sodass das Meereis rekordverdächtig stark schmolz.



FRÜHLINGSSPAZIERGANG AM EISFREIEN FJORD

Der Kongsfjord auf Spitzbergen friert im Winter nicht mehr vollständig zu. Der Meeresarm ist deshalb auch im Frühling relativ schnell eisfrei.

„Solche Einbrüche warmer Luft sind selten, hat es in der Vergangenheit aber immer schon gegeben", sagt der AWI-Klimaforscher Prof. Thomas Jung. „Das sind zunächst Einzelereignisse, aus denen sich nicht ohne Weiteres eine Tendenz ablesen lässt."

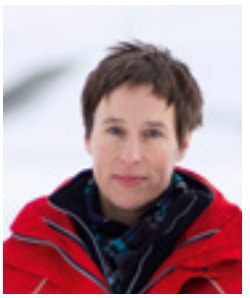
Thomas Jung ist Experte für Klimamodellierungen. Für ihn besteht die Herausforderung darin, die Klimaphänomene grundsätzlich zu verstehen und mithilfe mathematischer Modellrechnungen abzuschätzen, wie sich das Klima künftig entwickeln wird. Dabei untersuchen Thomas Jung und seine Mitarbeiter, wie Klimaänderungen in den Tropen und mittleren Breiten die Polarregionen beeinflussen, aber auch umgekehrt, wie die Veränderungen in der Arktis und Antarktis auf die mittleren Breiten wirken.

Feldforscher profitieren von Modellierern und umgekehrt

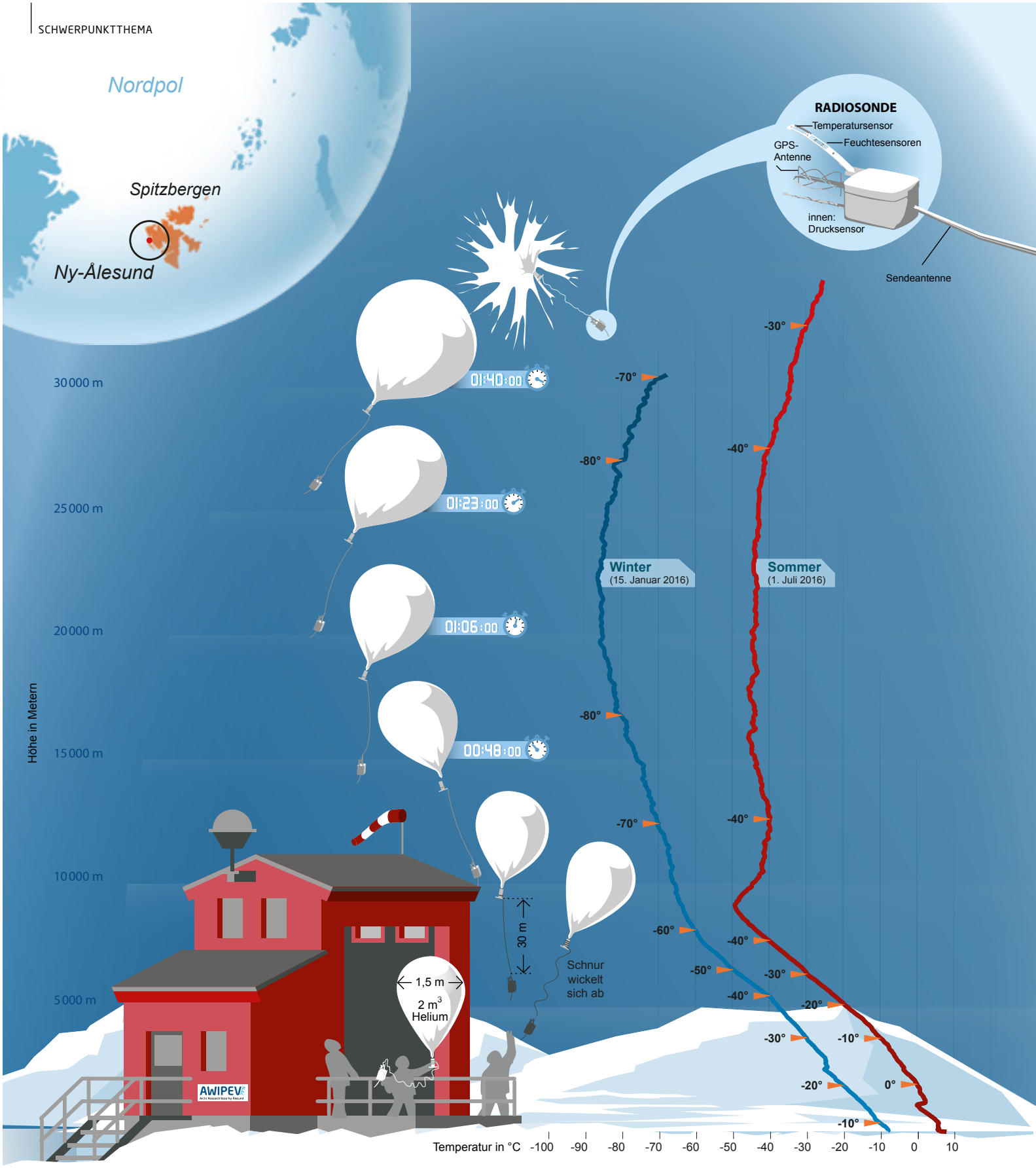
Noch vor wenigen Jahren war die arktische Klimaforschung in zwei Lager gespalten: Die Forscher, die vor Ort maßen und Proben nahmen, und jene, die mit Klimamodellen versuchten, das Wesen der Arktis zu verstehen. „Die Feldforscher trauten unseren Modellen nicht und wir wussten, dass es schwierig ist, aus einzelnen Messungen auf das große Ganze zu schließen", sagt Thomas Jung. Das sei heute anders: Inzwischen arbeite man eng zusammen – etwa mit Christian Haas. „Auch, weil die Modelle heute tatsächlich deutlich besser als noch vor 15 Jahren sind", so Thomas Jung. Feldforscher und Modellierer profitieren voneinander. Die Klimamodellierer können mit den Messdaten aus dem Feld ihre Modelle testen und weiterentwickeln. Die Feldforscher hingegen erhalten von den Modellierern wichtige Hinweise darauf, welche Parameter für das Verständnis des Klimas besonders wichtig sind. Thomas Jung: „Wir wissen beispielsweise, dass die Vorgänge in den untersten →

„Ich leite das meteorologische Observatorium der AWIPEV-Station. Mein Aufgabengebiet reicht von der Erfassung der Messdaten bis hin zur wissenschaftlichen Interpretation. Außerdem koordiniere ich die internationale Zusammenarbeit. Jeder Tag ist anders. Ich arbeite viel am Computer und bin oft bei internationalen Treffen. Und ich freue mich, wenn ich ab und zu auch selbst einen Wetterballon starten kann."

DARUM LIEBE ICH MEINEN JOB



DR. MARION MATURILLI
Meteorologin

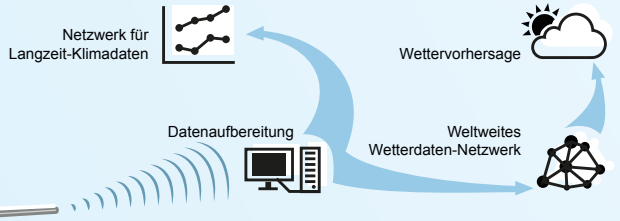

Nordpol
Spitzbergen
Ny-Ålesund
RADIOSONDE
Temperatursensor
Feuchtesensoren
GPS-Antenne
innen: Drucksensor
Sendeantenne
01:40:00
01:23:00
01:06:00
00:48:00
30 m
1,5 m
2 m³ Helium
Schnur wickelt sich ab
AWIPEV
30 000 m
25 000 m
20 000 m
15 000 m
10 000 m
5 000 m
Höhe in Metern
Winter
(15. Januar 2016)
Sommer
(1. Juli 2016)
-70°
-80°
-80°
-70°
-60°
-50°
-40°
-30°
-40°
-40°
-30°
-20°
-30°
-10°
-20°
0°
-10°
Temperatur in °C -100 -90 -80 -70 -60 -50 -40 -30 -20 -10 0 10

So erwärmt sich die Arktis

Wer das Klima der Arktis verstehen will, muss über eine lange Zeit ganz genau hinschauen. AWI-Wissenschaftler an der deutsch-französischen Forschungsstation AWIPEV in Ny-Ålesund, Spitzbergen, lassen deshalb einmal täglich einen Wetterballon steigen. Die am Ballon befestigte Radiosonde misst die Lufttemperatur, den Luftdruck, die Luftfeuchtigkeit und den Wind bis in eine Höhe von 30 Kilometern und funkt die Daten alle zwei Sekunden zur Bodenstation. Die wichtigste Erkenntnis dieser Langzeitbeobachtungen seit 1993: Die Winter in Spitzbergen werden wärmer – auch in der Luftsäule bis zehn Kilometer Höhe.

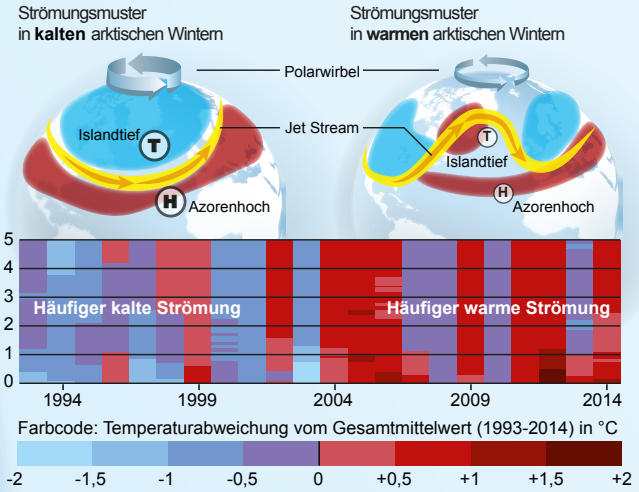
WER NUTZT DIE MESSDATEN DER RADIOSONDE?

Wettervorhersage-Zentren und Klimaforscher weltweit.



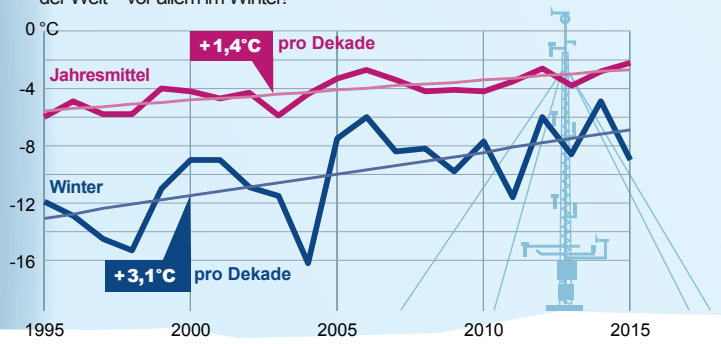
WIE HAT SICH DIE WINTERTEMPERATUR VERÄNDERT?

Seit Beginn der Ballonsondierungen steigt die Wintertemperatur der Luftschichten über Spitzbergen. Ein Grund sind veränderte Luftströmungen über dem Atlantischen Ozean, wodurch warme, feuchte Luft aus dem Süden weit nach Norden transportiert wird.



WIE STARK STEIGT DIE TEMPERATUR AM BODEN?

Die AWI-Langzeitmessungen in Spitzbergen zeigen auch: In der Arktis erwärmt sich die Luft am Boden deutlich stärker als in anderen Regionen der Welt – vor allem im Winter!



„DIE AUSSICHT FÜR EUROPA: WENIGER WESTWIND!"

AWI-Klimamodellierer errechnen, wie die Eisschmelze in der Arktis das Klima bei uns verändern könnte.

Das Verschwinden des Meereises in der Arktis geht jeden an. Denn wenn sich das Klima in der Arktis durch die Schmelze verändert, dann beeinflusst das auch das Klima in den gemäßigten Regionen der Nordhalbkugel – in Nordamerika, Europa und Asien. Welche Auswirkungen die zunehmenden Eisverluste in den kommenden Jahrzehnten haben könnten, hat ein Team um den AWI-Klimamodellierer Dr. Tido Semmler im Detail errechnet. „Wir können ziemlich sicher davon ausgehen, dass sich die Westwinde in den mittleren Breiten in der Winterzeit abschwächen werden", sagt Tido Semmler.
Weil die Westwinde schwächer ausfallen, wird weniger Wärme vom Nordostatlantik gen Osten transportiert – in Osteuropa und Eurasien kann es dadurch kälter und das Klima kontinentaler werden. „Unsere Modelle zeigen, dass dieser Effekt ohne Berücksichtigung der globalen Erwärmung in Teilen Westasiens und Osteuropas im Winterhalbjahr zu einer Abkühlung um bis zu 0,5 Grad führen könnte. Beziehen wir die globale Erwärmung mit ein, wird der Temperatursprung kompensiert", so der AWI-Forscher.

Die Abschwächung der Westwinde führt in den Modellrechnungen auch dazu, dass aus der Arktis verstärkt kalte Luft nach Russland vorstößt. „Damit könnte es mitten in Russland in bestimmten Situationen im Winter um weitere 2 Grad kälter werden", sagt Tido Semmler. In Nordamerika werden dieser Effekt und damit die Abkühlung vermutlich nicht so stark ausgeprägt sein.

In den Ergebnissen ist bereits berücksichtigt, dass es in der Arktis wärmer wird. Tido Semmler betont aber, dass die Ergebnisse nicht in Stein gemeißelt sind, weil Klimamodellierungen für Westeuropa sehr anspruchsvoll sind. Der Nordostatlantik gilt als Wetterküche für Europa, der durch Tiefdruckgebiete, durch Luftmassen aus der Arktis und durch Südwestwinde geprägt ist, die warme Luft herantransportieren. „Die natürlichen Schwankungen sind bereits so groß, dass es sehr schwer ist, den Einfluss der Arktis abzuschätzen", sagt der AWI-Klimaforscher. Hinzu kommt, dass es natürliche Klimaschwankungen gibt, die regelmäßig auftreten. Diese Effekte muss man von den Klimaveränderungen, die der Mensch bewirkt, sauber trennen.
Tido Semmlers Klimarechnungen sagen auch voraus, dass sich künftig in der Arktis und den mittleren Breiten während des Winters seltener Tiefdruckgebiete bilden, was zu stabilerem Winterwetter führen könnte. Im Mittelmeerraum hingegen könnten sich verstärkt Tiefdruckgebiete bilden, wodurch im Winter mehr Regen fallen würde. Noch interessanter als für Europa könnten Tido Semmlers Klimarechnungen für Ostasien und insbesondere auch Japan sein. „Wetter und Klima sind dort weniger variabel als in Westeuropa, auch scheint die Arktis hier einen größeren Einfluss zu haben", sagt Tido Semmler.





100 Metern der Atmosphäre über der Arktis das Klima dort besonders prägen." Über die Vorgänge in den höheren Luftschichten und deren Einfluss auf das arktische Klima weiß man weniger. So wird etwa die Schicht zwischen der oberen und unteren Atmosphäre insbesondere auch am AWI in Potsdam erforscht.
Die frühere Skepsis der Feldforscher gegenüber der Modellierung mag gute Gründe gehabt haben. Noch vor wenigen Jahren berücksichtigten Wettervorhersagemodelle, welche die Vorgänge und die Veränderungen in der Atmosphäre beschreiben, den Einfluss des Meereises nur in sehr vereinfachter Form. Wenn das Eis überhaupt einbezogen wurde, dann wurde es als statische Größe betrachtet – oder als homogen honigartig fließende Masse in den Berechnungen berücksichtigt. „Ein wesentlicher Teil der Eisdynamik fiel damit unter den Tisch, die Bildung offener Wasserflächen zum Beispiel oder das Aufbrechen der Eisschollen", sagt Thomas Jung. „All das kann aber die klimatischen Bedingungen in den Polarregionen beeinflussen."
Eine geschlossene Eisdecke etwa wirkt wie ein Deckel auf dem Ozean, über dem sich stabile Kaltluftschichten bilden. Flächen offenen Wassers führen zu einer Erwärmung der Atmosphäre, wodurch die bodennahen Luftmassen in Bewegung geraten.
Um vernünftige Aussagen zur Zukunft des Meereises in den Polarregionen machen zu



HEIMAT VON VIER MILLIONEN MENSCHEN

Der Temperaturanstieg in der Arktis verändert die Lebensgrundlage für rund vier Millionen Menschen. Nordische Fischer beispielsweise fangen heute Atlantischen Kabeljau, der aus dem Süden eingewandert ist.

6 100 000 000

US-DOLLAR

wird es schätzungsweise kosten, Schäden an der Infrastruktur Alaskas zu reparieren, die bis zum Jahr 2030 durch die Folgen des Klimawandels entstehen. In diese Rechnung einbezogen sind Schäden an Straßen, Gebäuden, Schienen und Flughäfen, die durch Überflutungen, Küstenerosion und durch das großflächige Auftauen des Dauerfrostbodens (Permafrost) verursacht werden.

können, reiche ein einziges Klimamodell ohnehin nicht aus, sagt Thomas Jung. Deshalb gibt es derzeit gleich mehrere internationale Kooperationsprojekte, in denen Wissenschaftler die Ergebnisse ihrer Modelle miteinander vergleichen, um Unsicherheiten der Modelle zu bestimmen. Nach diesem Prinzip erarbeitet auch der Weltklimarat seine Aussagen über mögliche künftige Klimaveränderungen. Climate Model Intercomparison Project (Klimamodell-Vergleichsprojekt) nennt der Weltklimarat diese Arbeit der verschiedenen Klimamodellierer-Gruppen weltweit.
Die Ergebnisse des fünften Vergleiches wurden im Jahr 2013 veröffentlicht. Seitdem hat sich in der Klimamodellierung viel getan. Thomas Jung und seine AWI-Kollegen arbeiten deshalb in einem neuen internationalen Vergleichsprojekt mit, um aktuelle Zukunftsprojektionen zu generieren. Seine Ergebnisse werden ebenfalls dem Weltklimarat zur Verfügung stehen.

MOSAiC - ein neuer Meilenstein in der internationalen Arktisforschung

Viele grundlegende Fragen zum Zusammenspiel zwischen Meereis, Ozean, Land und Atmosphäre in der Arktis aber sind noch immer unbeantwortet – vor allem auch, weil Daten aus den Wintermonaten fehlen. Die Klimaforscher des AWI bereiten deshalb gemeinsam mit Partnern aus 13 Nationen das Großprojekt MOSAiC vor, das neue Maßstäbe in der internationalen Arktisforschung setzen wird.
Geplant ist, dass sich der deutsche Forschungseisbrecher Polarstern im Herbst 2019 im arktischen Meereis einfrieren lassen wird, um anschließend ein Jahr lang mit dem Eis quer durch die Arktis zu treiben – von der sibirischen Küste bis zur Framstraße, jener Meerenge zwischen Grönland und Spitzbergen, die in den Atlantik mündet. Während dieser Zeit werden rund 350 Wissenschaftler aus 50 Forschungseinrichtungen in verschiedenen Etappen auf dem Schiff arbeiten. Das große Ziel lautet, innerhalb kurzer Zeit eine große Menge an Daten zu gewinnen – mit Flugzeugüberflügen, mit Messungen vom Schiff aus, mithilfe von autonomen Unterwasserfahrzeugen, Tiefseerobotern, Satellitenaufnahmen und mit Messungen vor Ort auf, im und unter dem Eis. Eisbrecher aus anderen Nationen werden von Zeit zu Zeit dazu stoßen.
Bevor die Feldforscher vor Ort messen, werden die Klimamodellierer vorbereitende Experimente durchführen. „Wir können dann gemeinsam mit den Feldforschern eine optimale Beobachtungsstrategie entwickeln “, sagt Thomas Jung. Einzigartig ist auch, dass in diesem vom AWI koordinierten Großprojekt gleichzeitig biologische, chemische, meteorologische und ozeanografische Aspekte bearbeitet werden. „Wir gehen davon aus, dass wir schon während der Drift wichtige Ergebnisse erzielen werden, die uns helfen, unser globales Klimasystem besser zu verstehen“, sagt AWI-Projektkoordinator Prof. Markus Rex. Insofern wird MOSAiC für die Arktisforschung, was die Mondlandung für die Raumfahrer war – ein echter Meilenstein. Nie zuvor waren zeitgleich so viele Forscher unterschiedlicher Disziplinen gemeinsam in der Arktis unterwegs. //

KOMPAKT

- **Die Arktis erwärmt sich doppelt so schnell wie der Rest des Planeten. Seit den 1990er Jahren sind vor allem die Winter wärmer geworden. Seit Anfang der 1980er Jahre ist das Meereisvolumen durchschnittlich um mehr als neun Prozent pro Dekade zurückgegangen.**
- **Feldforscher und Modellierer arbeiten heute Hand in Hand, um die Klimamodelle und damit die Vorhersagen zu verbessern.**
- **Unter Leitung des AWI wird der deutsche Forschungseisbrecher Polarstern ab Herbst 2019 ein Jahr lang über den Arktischen Ozean treiben und als Plattform für das internationale Großforschungsprojekt MOSAiC dienen.**

E-Mails vom Filchner-Schelfeis

Das Schicksal der Küsten unserer Welt entscheidet sich in der Antarktis. Dort verhindern bisher große Schelfeise, dass gigantische Eismassen vom Land in das Meer rutschen und den Meeresspiegel ansteigen lassen. Doch wie lange wird diese Bremse noch funktionieren? Im Zuge mehrerer Expeditionen haben AWI-Forscher Messgeräte direkt unter dem Filchner-Ronne-Schelfeis platziert und verfolgen jetzt live, ob und wie die Wärme des Meeres dem mächtigsten Eisbremsklotz der Antarktis gefährlich wird.





Die Zelte stehen: Der Aufbau des Bohrcamps auf dem Filchner-Schelfeis dauerte selbst bei guten Wetterverhältnissen mindestens einen Tag. In diesen Zelten schliefen die acht Forscher und Techniker aus Deutschland und Großbritannien. Ein größeres Zelt mit Holzfußboden diente ihnen als Arbeits- und Kochzelt.

Text: **SINA LÖSCHKE**

Das Filchner-Ronne-Schelfeis galt bislang kaum als Sorgenkind der Klimawissenschaft. Die Eisfläche von der Größe Schwedens bedeckt eine Bucht tief im Süden des Weddellmeeres – in einer Region, in der die durchschnittliche Lufttemperatur im Sommer 2016 noch frostige minus 11,4 Grad Celsius betrug. Aus Richtung Osten, Süden und Westen münden Gletscher in diese Bucht. Sie speisen das Filchner-Ronne-Schelfeis mit Eismassen des Ost- und des Westantarktischen Eisschildes und sind der Grund, warum die mächtigste permanent schwimmende Eisdecke der Antarktis an ihrer dicksten Stelle bis zu 1600 Meter misst. Und die Liste der Superlative geht weiter.

An der Unterseite des Filchner-Ronne-Schelfeises zirkulieren die kältesten Wassermassen der Welt. Minus 2,5 Grad Celsius beträgt ihre Temperatur. Flüssig bleibt das Wasser dort nur aufgrund des hohen Drucks in der Tiefe. „Dieses sehr salzhaltige Wasser schützt das Filchner-Ronne-Schelfeis bisher vor dem Abschmelzen“, sagt AWI-Ozeanograph Dr. Tore Hattermann. Es entsteht, wenn im Winter das Meer vor dem Schelfeis gefriert und Salzlauge aus dem →



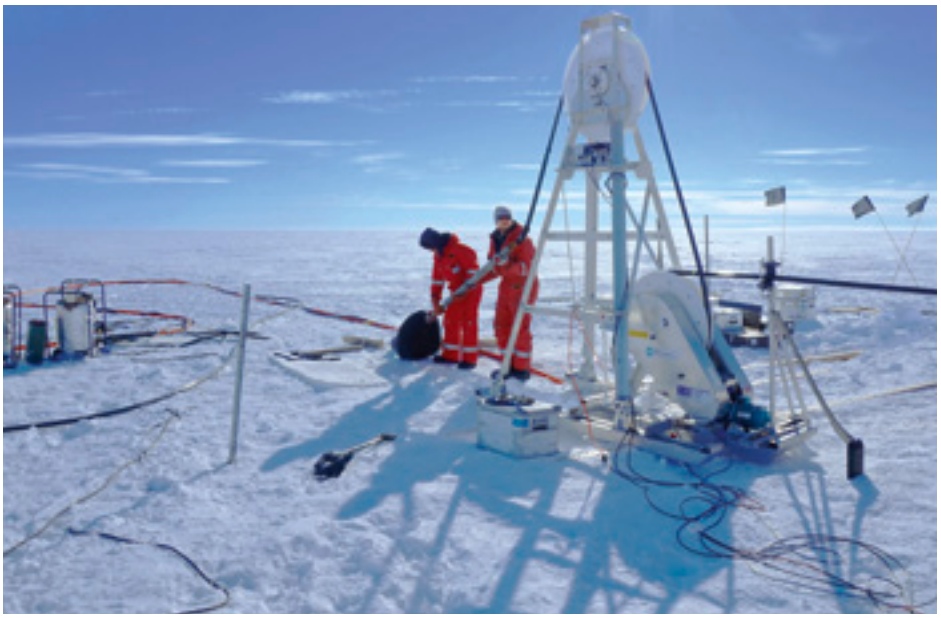
Um die insgesamt 13 Tonnen Camp- und Bohrausrüstung auf das Filchner-Schelfeis zu bekommen, flog die Twin Otter des British Antarctic Survey zwölf Mal vom Winterdepot auf Berkner Island auf das Schelfeis. AWI-Ozeanograph Tore Hattermann (links) und sein britischer Kollege Scott Webster hatten beim Entladen des Flugzeuges dementsprechend viel zu tun.

Meereis in das darunterliegende Wasser rinnt. Dessen oberste Schicht wird dichter, sinkt ab und bildet auf dem Kontinentalschelf – also vor und unter dem Schelfeis – eine Kaltwasserbarriere, die bisher verhindert, dass wärmeres Wasser aus dem Weddellmeer unter das Schelfeis strömen kann.

Negativ-Beispiel Amundsensee

Was passiert, wenn warmes Wasser aus dem Zirkumpolarstrom unter die Schelfeise gelangt, beobachten Polarforscher seit einigen Jahrzehnten im Amundsenmeer in der Westantarktis. Dessen Schelfeise schmelzen an der Unterseite und verlieren nach und nach den Bodenkontakt und damit ihre Bremswirkung für die dahinterliegenden Gletscher. Zusammengenommen haben die Eisströme des Amundsenmeeres allein im Jahr 2013 rund 334 Gigatonnen Eis eingebüßt. Das waren rund 110 Gigatonnen mehr als noch im Jahr 1994. Vergleicht man die aktuellen Schmelz- und Kalbungsraten mit den Daten aus dem Jahr 1977, dann verlieren sie heute 77 Prozent mehr Eis als noch vor 40 Jahren. Gleichzeitig schieben fast alle Gletscher ihre Eismassen deutlich schneller Richtung Meer als dies in den 1970er-Jahren der Fall war. Eine Tatsache, die auch erklärt, warum diese Region allein inzwischen zehn Prozent zum weltweiten Meeresspiegelanstieg beiträgt.

Die Gletscher im Hinterland des Filchner-



Das Heißwasserbohrsystem wurde von Ingenieuren des British Antarctic Survey entwickelt. Nach wenigen Tagen Einarbeitung aber konnte sich das deutsch-britische Team die stundenlangen Schichten am Bohrgerät teilen.



Den Umzug von einer Bohrstelle zur nächsten meisterte das Team mit Schneemobilen und Schlitten. Auf diesem stapeln sich abreisefertig die Fässer mit Treibstoff für Generatoren und Heizgeräte.

Ronne-Schelfeises vereinen so viel Eis, dass der weltweite Meeresspiegel um rund zwölf Meter steigen würde, sollte der Bremsklotz verschwinden und alles Inlandeis ins Meer rutschen. Doch droht dem Filchner-Ronne-Schelfeis das gleiche Schicksal wie den Eisströmen im Amundsenmeer? Um diese Frage zu beantworten, kombinieren die AWI-Ozeanographen Klimamodellierungen (siehe Grafik S. 22/23) mit aufwendigen Messungen im Weddellmeer sowie im und unter dem Schelfeis selbst.

„Unsere Modellierungen deuten darauf hin, dass sich die Antarktis in den nächsten Jahrzehnten erwärmen wird. Im Zuge dessen wird sich vermutlich nicht mehr so viel Meereis bilden, was unter Umständen dazu führen könnte, dass die Kaltwasserbarriere in der zweiten Hälfte dieses Jahrhunderts zusammenbricht", sagt AWI-Ozeanograph Dr. Hartmut Hellmer. „Das warme Wasser könnte dann auf direktem Weg unter das Schelfeis gelangen. Ob diese Entwicklung schon begonnen hat, überprüfen wir derzeit auf mehreren Polarstern-Expeditionen in das Weddellmeer und mit Messketten, die wir in und unter dem Eis platziert haben."

Um die Geräte unter das Schelfeis zu bekommen, haben Tore Hattermann und sein deutsch-britisches Team im Zuge zweier Sommerexpeditionen sieben Löcher durch das bis zu 900 Meter dicke Eis gebohrt. „Drei Bohrlöcher befinden sich im Norden, rund →

„Bei meiner Arbeit kann ich mich immer wieder in neue Aufgaben und Probleme hineindenken und muss Schritt für Schritt eine Lösung oder Erklärung finden. Wenn dann am Ende Beobachtungen einen Sinn ergeben und sich in einen größeren Zusammenhang einordnen lassen, ist das ein tolles Gefühl. Außerdem liebe ich die internationale Zusammenarbeit in der polaren Ozeanographie. Ich lerne viele Menschen unterschiedlicher Nationen kennen."

DARUM LIEBE ICH MEINEN JOB



SVENJA RYAN
Ozeanographin

60 Kilometer hinter der Kalbungsfront des Schelfeises, vier weitere rund 200 Kilometer weiter südlich", erzählt er. An allen Messstellen dokumentieren nun Termistorketten direkt im Schelfeis, wie kalt das Eis in seinen verschiedenen Schichten ist. Im Wasser darunter messen Sensoren in verschiedenen Tiefen die Temperatur, den Salzgehalt, die Strömungsgeschwindigkeit und -richtung der Wassermassen. Die Messdaten werden nachts via Satellit an Tore Hattermann geschickt. „Ich erhalte an jedem Morgen 28 E-Mails vom Filchner-Schelfeis. Im Anhang befinden sich die Daten", erzählt der 33-Jährige.

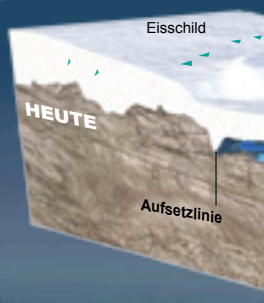
Eine logistische Meisterleistung

Die einfache Datenübertragung täuscht darüber hinweg, welche logistische Meisterleistung vollbracht wurde, bis alle Messgeräte installiert waren. „Für unsere Heißwasserbohrungen benötigten wir 13 Tonnen Ausrüstung, deren Einzelteile über mehrere Sommer hinweg mit dem Eisbrecher Polarstern und anderen Schiffen zum Schelfeis gebracht wurden. Hinzukommt der gesamte Treibstoff für die Twin Otter-Flüge, die Schneemobile und die Generatoren. Die AWI-Glaziologen haben zudem auf langen Traversen seismische Messungen durchgeführt, um die Topografie des Meeresbodens unter dem Schelfeis zu untersuchen. Auch sie war bisher unbekannt", sagt Tore Hattermann.

Zeitgleich zu den Bohrarbeiten auf dem Eis, untersuchten die AWI-Ozeanographen Dr. Michael Schröder und Svenja Ryan von Bord des Forschungseisbrechers Polarstern die Strömungsverhältnisse im östlichen Weddellmeer – etwa 250 Kilometer vor der Eisfläche. Dort, am Auslauf des Filchner-Trogs, einem tiefen Graben, installierten die Wissenschaftler drei Messgeräteketten, die an 365 Tagen pro Jahr dokumentieren, ob es den 0,8 Grad Celsius warmen Wassermassen aus dem Weddellwirbel bereits gelingt, auf die Kontinentalplatte zu klettern und in den Filchner-Trog einzudringen. „Unsere Daten aus den ersten drei Jahren zeigen jahreszeitliche Schwankungen der Strömung. Im antarktischen Sommer gelangen die warmen Wassermassen tatsächlich auf den Kontinentalschelf. Zum Winter hin aber dominiert das kalte →

Wie die Wärme des Ozeans das Schelfeis angreift

Der Eispanzer der Antarktis liegt nicht überall auf festem Boden. An den Rändern des Kontinentes schieben sich die Eismassen Hunderte Kilometer weit auf das Meer hinaus. Diese schwimmenden Eiszungen werden Schelfeis genannt und bremsen bisher einen schnellen Abfluss des Inlandeises ins Meer. Je wärmer es aber in der Antarktis wird, desto häufiger versagt die Schelfeisbremse. Der Grund: Es bildet sich weniger Meereis. Infolgedessen sinkt der Salzgehalt und damit die Dichte des Wassers auf dem Schelf, wodurch warme Strömungen unter die Eiszungen gelangen und sie von unten schmelzen. Wie das vonstatten gehen kann, zeigt diese Grafik am Beispiel des Filchner-Ronne-Schelfeises.

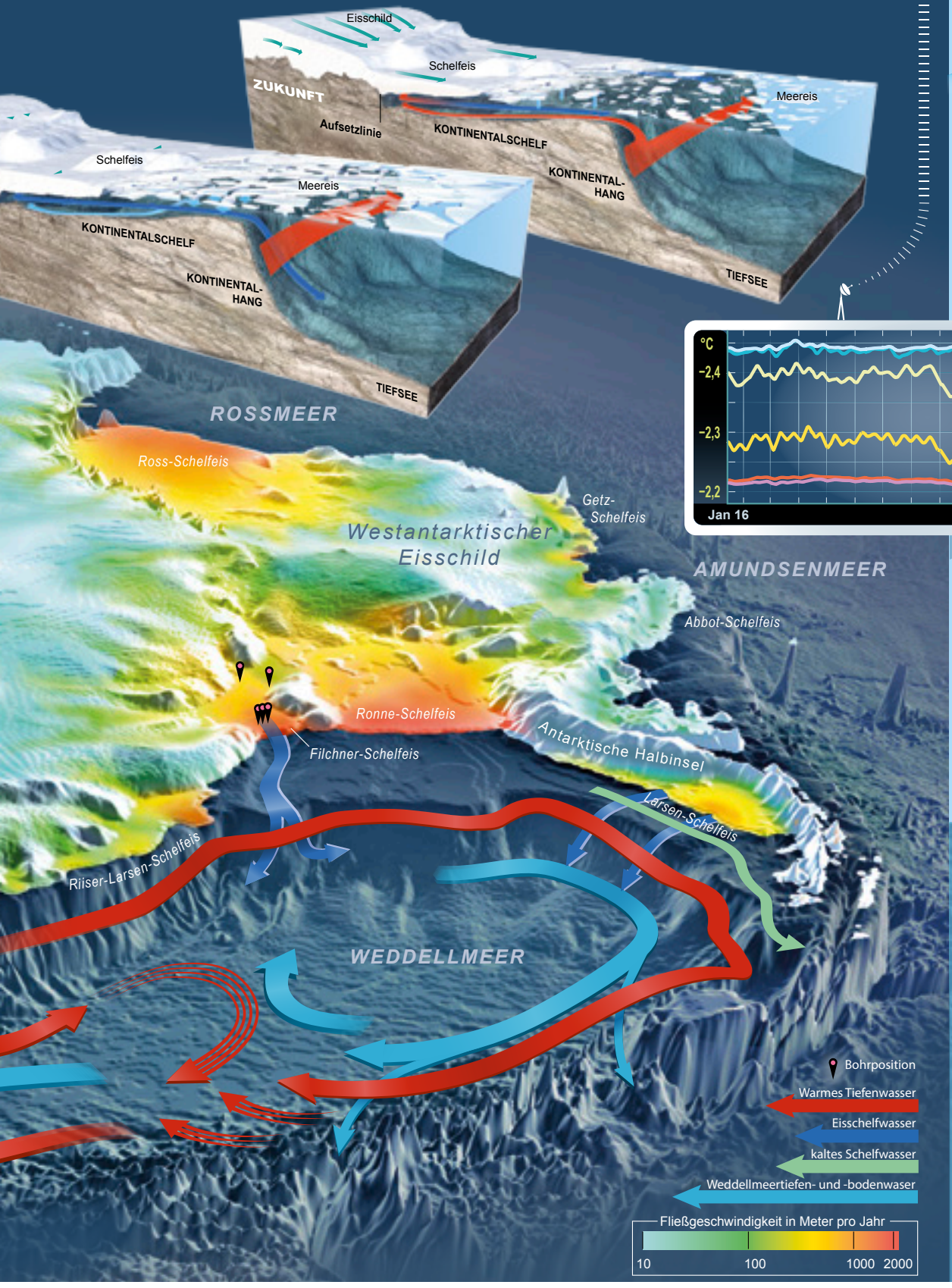


Die Strömungen im Weddellmeer heute

Unter dem Filchner-Ronne-Schelfeis zirkulieren bislang die kältesten Wassermassen der Welt. Ihre Temperatur beträgt bis zu -2,5 Grad Celsius (dunkelblauer Pfeil). Direkt am Kontinentalhang dagegen strömt 0,8 Grad Celsius warmes Wasser, welches der Weddellwirbel durch die große Meeresbucht transportiert (roter Pfeil).

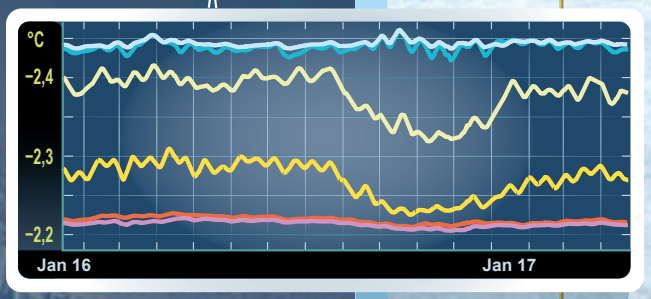
Der künftige Weg der Wärme

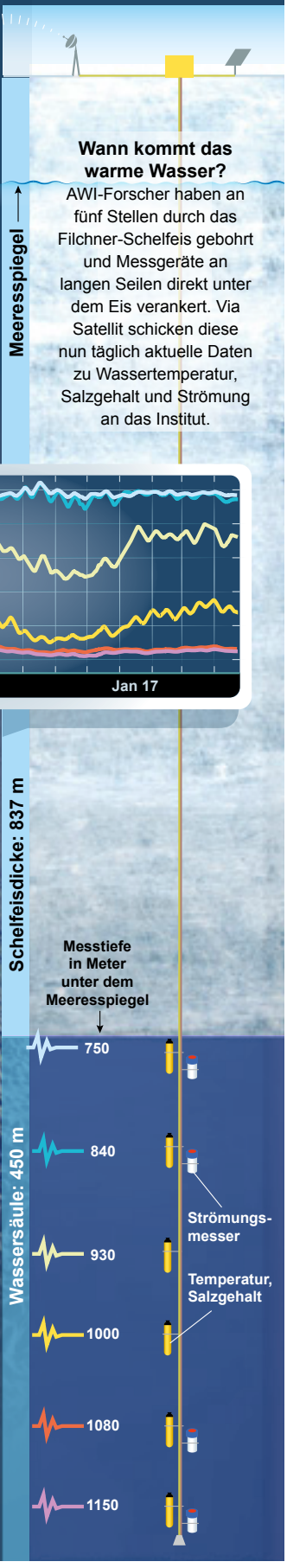
AWI-Forscher können mithilfe von Computermodellen zeigen, dass sich künftig weniger Meereis vor dem Filchner-Ronne-Schelfeis bilden wird. Dadurch kann das warme Wasser (rot) unter die Eisplatte strömen und es von unten schmelzen – ein Wärmekreislauf, der dann nicht mehr zu stoppen sein wird.

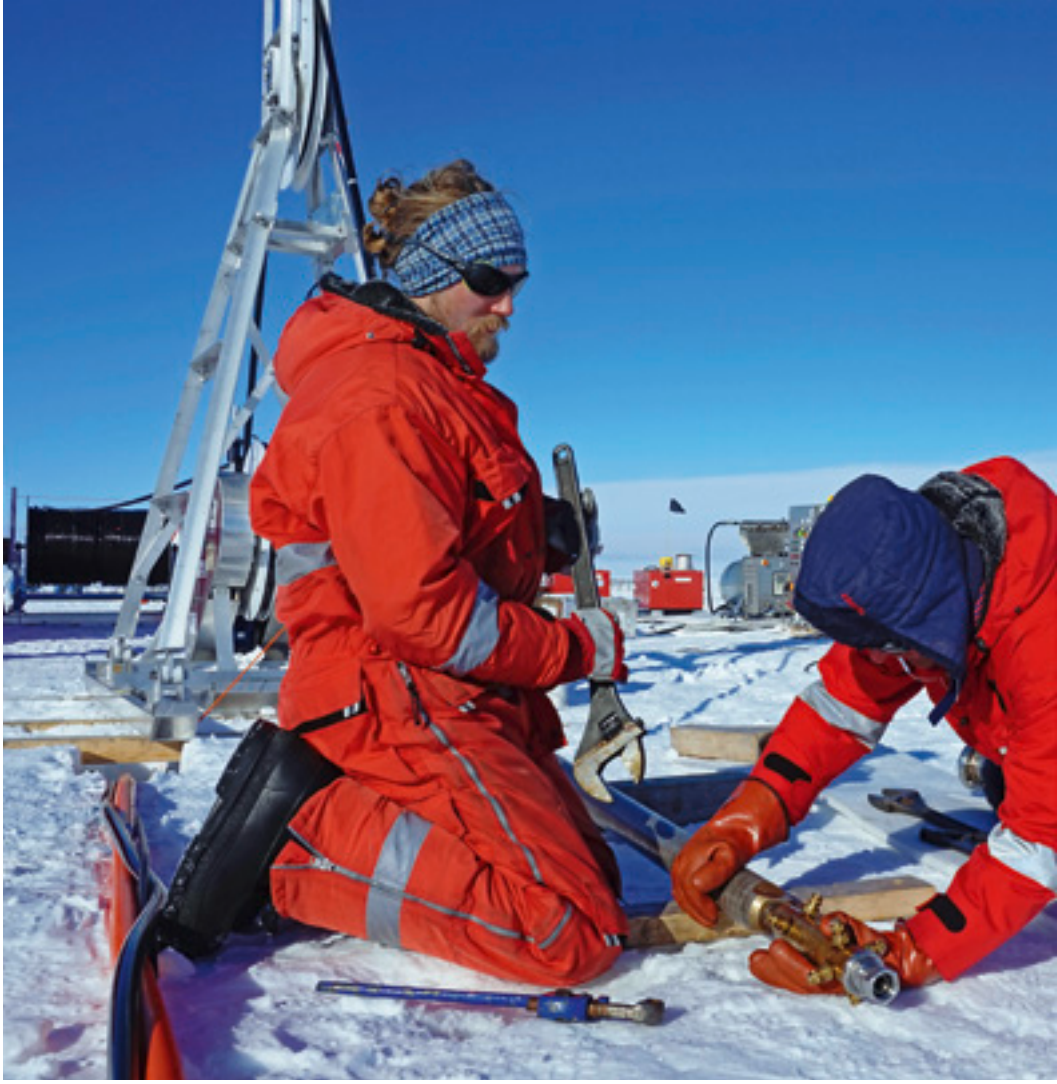


Wann kommt das warme Wasser?

AWI-Forscher haben an fünf Stellen durch das Filchner-Schelfeis gebohrt und Messgeräte an langen Seilen direkt unter dem Eis verankert. Via Satellit schicken diese nun täglich aktuelle Daten zu Wassertemperatur, Salzgehalt und Strömung an das Institut.







Die AWI-Techniker Johannes Lohse (links) und Jörg Brozek schrauben den „Bohrkopf" an den langen Bohrschlauch. Aus diesem Rohr schießt später das heiße Bohrwasser und schmilzt ein etwa 30 Zentimeter breites Loch senkrecht durch das Eis.



Das Bohrwasser musste das Team aus Schnee schmelzen. Um den gelben Tank im Bildvordergrund einmal vollständig mit zehn Kubikmeter Wasser zu füllen, schippten drei der Männer zwölf Stunden lang Schnee.

95

GRAD CELSIUS

misst die Temperatur des Wassers, mit dem sich Polarforscher bei Schelfeis-Bohrungen durch den Eispanzer schmelzen. Anstelle eines Bohrers hantieren die Wissenschaftler also mit einem Schlauch und einer Wasserspritze. Hat die „Bohrung" erst einmal begonnen, darf der Nachschub an heißem Wasser bis zum Schluss nicht abreißen – andernfalls gefriert die Flüssigkeit in den Leitungen sofort und lässt die Schläuche platzen.

und schwere Eisschelfwasser wieder. Die warmen Wassermassen schaffen es dann nicht mehr den steilen Hang auf die Kontinentalplatte hinauf", erklärt Svenja Ryan.
Messergebnisse ihrer norwegischen Kollegen bestätigen sogar, dass es die Warmwasser-Pulse phasenweise bis zum Schelfeis schaffen. Wie lange es sie allerdings schon gibt, ob sie stärker werden und sogar schon unter das Eis reichen, können die AWI-Experten nicht sagen. Das Weddellmeer gehört nämlich noch immer zu den am wenigsten erforschten Meeresgebieten der Welt. „Uns fehlen tatsächlich aussagekräftige Daten. Polarstern war vor diesen zwei Reisen das letzte Mal im Jahr 1995 in dieser Region – und auch damals konnten wir nur Sommerdaten sammeln. Mit unseren neuen Verankerungen unter dem Schelfeis und am Rand des Filchner-Trogs wollen wir nun zumindest fünf Jahre lang kontinuierlich Daten sammeln, um das Strömungssystem besser zu verstehen und genauere Vorhersagen treffen zu können", sagt Ozeanograph Michael Schröder.
Die ersten Daten der AWI-Verankerungen unter dem Eis zeigen, dass die bisherigen Vorstellungen zur Zirkulation unter dem Schelfeis zu einfach waren. „Wir sind bisher davon ausgegangen, dass die Strömung von den kalten Wassermassen aus der Ronne-Schelfeis-Kaverne dominiert wird. Deren Einfluss scheint sich aber auf den südlichen Teil des Filchner-Schelfeises zu beschränken. Unter dem nördlichen Teil zirkulieren vorwiegend Wassermassen aus dem vorgelagerten Filchner-Trog", sagt Hartmut Hellmer. Die Zukunft des zweitgrößten Schelfeises der Antarktis genau vorherzusagen, wird sich also noch schwieriger gestalten, als es die Wissenschaftler angenommen haben. //



KOMPAKT

- AWI-Modellrechnungen geben Hinweise darauf, dass ab dem Jahr 2070 warme Wassermassen aus dem Weddellmeer unter das flächenmäßig zweitgrößte Schelfeis der Antarktis strömen könnten und dann dessen Abschmelzen beschleunigen würden.
- AWI-Ozeanographen haben in aufwendigen Expeditionen Messgeräte im und unter dem Schelfeis sowie am Eingang eines tiefen Trogs auf dem Kontinentalschelf verankert, um einen möglichen Warmwassereinstrom zu überwachen.
- Erste Ergebnisse zeigen: Die warmen Wassermassen aus dem Weddellmeer strömen im Sommer auf den Kontinentalschelf. Im Winter aber dominiert dort noch immer das superkalte Schelfeiswasser.



EIN GLETSCHER AM SCHEIDEWEG

Im Nordosten Grönlands macht die Wärme des Meeres einem Eisstrom Beine

Der 79°-Nord-Gletscher in Grönland hat so einiges gemeinsam mit dem Filchner-Ronne-Schelfeis in der Antarktis. Der Eisstrom an Grönlands Nordostküste ist einer der wenigen, dessen Eiszunge noch weit in einen Fjord hineinreicht. 80 Kilometer ist sie lang! Eine beeindruckende Eisfläche. Doch auch ihre Zukunft hängt maßgeblich davon ab, ob es warmem Wasser künftig dauerhaft gelingen wird, unter den Gletscher zu strömen und den Eisstrom von unten zu schmelzen. „Wir wissen, dass sich unter der schwimmenden Gletscherzunge eine bis zu 900 Meter tiefe Kaverne befindet, die in einer Tiefe von mehr als 400 Metern mit 1,0 Grad Celsius warmem Atlantikwasser gefüllt ist. Dessen Wärme lässt das Eis an der Gletscherunterseite schon jetzt in hohen Raten schmelzen“, sagt AWI-Ozeanographin Dr. Janin Schaffer.

Sie untersucht, wie dieses warme Atlantikwasser aus der Framstraße zum 79°-Nord-Gletscher transportiert wird. Eine Forschungsfrage, mit der sie vor drei Jahren Neuland betrat: „Aus dem entscheidenden Gebiet direkt vor dem Gletscher gab es am Anfang keine Daten, weil eine dicke Meereisdecke schiffsbasierte Messungen stets vereitelt hatte. Es war noch nicht einmal bekannt, wie tief der Meeresboden an der Gletscherfront ist, geschweige denn, auf welchem Weg das Atlantikwasser zum 79°-Nord-Gletscher hinfließt“, erzählt sie.

Heute, drei Polarstern-Expeditionen später, fügen sich die vielen verschiedenen Datenpuzzleteile langsam zu einem Bild zusammen. „Wir haben bei unseren Untersuchungen des Meeresbodens ein tiefes Grabensystem gefunden, durch welches das warme Wasser aus der Framstraße zunächst auf den Kontinentalschelf fließt und von dort direkt unter die Gletscherzunge“, sagt Janin Schaffer. Die Strömungsmessungen ergaben zudem, dass die Wassermassen weniger als 1,5 Jahre für ihren Weg zum Gletscher benötigen. Das heißt: Sollte künftig besonders warmes Wasser aus dem Nordatlantik in die Framstraße fließen, dauert es voraussichtlich nur kurze Zeit, bis ein solches Wärmesignal auch den 79°-Nord-Gletscher erreicht.

WENN ZWEI SICH „STREITEN“...

Der September ist für Monica Ionita und Frank Kauker in jedem Jahr die Zeit der Entscheidung. Dann nämlich steht fest, wer von beiden die Sommer-Ausdehnung des arktischen Meereises für diesen Monat am treffendsten vorhergesagt hat. Ein Methodenwettstreit, der die Forschung vorantreibt!



Dr. Frank Kauker

Vorhersagen mit einem Modell aus einem Guss

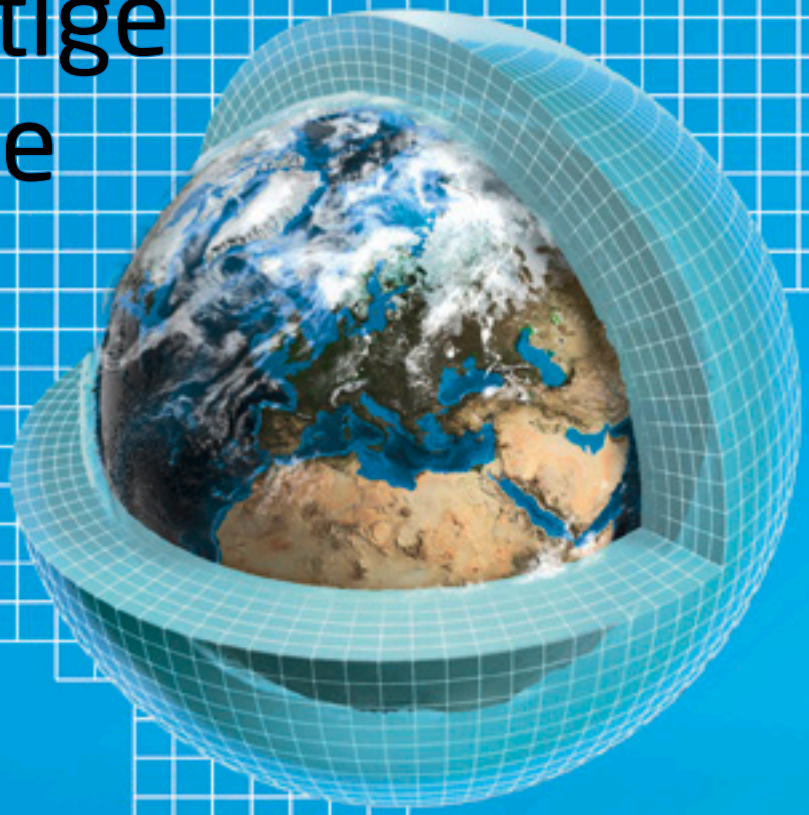
Meereismodellierer des AWI beteiligen sich seit dem Jahr 2008 an dem internationalen Vorhersagewettbewerb zum arktischen Meereisminimum. Dieser Wettbewerb beginnt stets im Juni, wenn der Sommer in der Arktis Einzug hält und die Eisdecke zu schmelzen beginnt. Als Meereisminimum bezeichnen wir die Fläche, auf die das Meereis schrumpft, bevor Ende September der Winter zurückkehrt und neues Eis gefriert.
Ich arbeite seit zehn Jahren bei meiner Vorhersage mit einem dynamischen Klimamodell für die Arktis. Es ist ein Modell aus einem Guss und berechnet mithilfe vieler mathematischer Gleichungen die physikalischen Wechselwirkungen zwischen dem Meereis und dem Ozean in dieser Region. Dieses Modell füttere ich am Anfang meiner Arbeit mit den aktuellsten Meereisdickendaten des CryoSat-2-Satelliten und lasse es dann in die Zukunft rechnen. Wir AWI-Meereismodellierer sind im Moment die einzige Forschergruppe weltweit, die CryoSat-2-Daten für diese Vorhersage nutzen. Wir wissen, dass wir diesen Ausgangsdaten trauen können. Schließlich überprüfen unsere Kollegen sie jedes Frühjahr aufs Neue auf unseren Flugzeug- und Schiffskampagnen.
Als ich vor fast zehn Jahren meine erste Meereisvorhersage gemacht habe, hielt ich es eigentlich für unmöglich schon im Juni oder Juli, treffende Prognosen zum September-Minimum abzugeben, weil das Sommerwetter eine so entscheidende Rolle bei der Meereisentwicklung spielt. Und Wetter können wir bekanntlich nur für ein paar Tage vorhersagen. Heute weiß ich, dass wir die Vorhersagekraft unseres Modells verbessern, wenn es uns gelingt, den Anfangszustand des Modells gut zu bestimmen.
Eine gewisse Ungenauigkeit aber bleibt doch – das Sommerwetter hat natürlich einen Einfluss. Deshalb diskutieren Monica und ich unsere Ergebnisse, bevor jeder seine Vorhersage einreicht. Ja, ihre Methode unterscheidet sich grundlegend von meiner Arbeitsweise – es gibt praktisch keine Überlappung. Aber Monicas Ansatz erlaubt mir einen zweiten Blick auf die Meereisentwicklung. Wir erhalten ein vollständigeres Bild des Gesamtgeschehens, wenn wir unsere Erkenntnisse aus beiden Ansätzen verknüpfen.

Dr. Monica Ionita

Statistik auf der Basis vieler Klimaparameter

Im Gegensatz zu den Meereismodellierern brauche ich für meine Vorhersage kein Klimamodell. Stattdessen nutze ich Klimaparameter wie die Lufttemperatur, die Meeresoberflächentemperatur und den Wärmegehalt des Ozeans. Diese Daten werden durch Satelliten erhoben. Ich verwende sie in statistischen Rechenverfahren. Mit ihrer Hilfe ist es mir zum Beispiel schon gelungen, die Wasserstände europäischer Flüsse genau vorherzusagen, Trockenzeiten und Hochwasser inbegriffen. Es reizt mich, auszutesten, ob ich mit demselben Verfahren auch eine treffende Vorhersage für die Meereisentwicklung in der Arktis und der Antarktis abgeben kann. Denn für beide Regionen brauchen wir, angesichts des zunehmenden Schiffsverkehrs, gute Vorhersagesysteme.
Für meine Meereisvorhersage des arktischen September-Minimums schaue ich nicht auf die Arktis als Ganzes. Stattdessen konzentriere ich mich auf jene Regionen, die eine entscheidende Rolle bei der Meereisbildung spielen. Auf ihrer Basis mache ich dann die statistischen Berechnungen. In den vergangenen zwei Jahren konnten wir sowohl mit meinem statistischen Verfahren als auch mit dem Modellierungsansatz Vorhersagen machen, die das finale Meereisminimum ziemlich gut beschrieben haben. Beide Vorhersagemethoden zeigen also in dieselbe Richtung, was uns Wissenschaftlern Vertrauen in unsere Ergebnisse und Methoden gibt. Mein Verfahren kann helfen, jene Regionen zu identifizieren, die für die Meereisentwicklung von großer Bedeutung sind. Die Modellierer können diesen Gebieten dann mehr Aufmerksamkeit bei der Modellierung schenken. Frank und ich kommen aus verschiedenen Disziplinen der Klimaforschung. Er ist ein Meereis-Experte, ich bin Klimatologin. Wir beide sind aber auch Physiker und verstehen uns, wenn wir über unsere Methoden und Ergebnisse sprechen. Wenn zwei Kollegen mit unterschiedlichem Hintergrund zusammenarbeiten, ist das immer von Vorteil und bringt die Wissenschaft einen Schritt voran.

Stets die richtige Maschenweite



Für ihre Berechnungen teilen Klimamodellierer die Erde in ein Schachbrettmuster ein. Je kleiner die Felder dieses Gitternetzes sind, desto höher ist die Auflösung des Klimamodells – aber leider auch der Rechenaufwand. Mathematiker des AWI können den Globus jetzt mit einem Netz überziehen, dessen Maschenweite sich gezielt einstellen lässt. Damit lassen sich besonders interessante Regionen genauer auflösen, ohne dass sich der Rechenaufwand wesentlich erhöht.

Text: **TIM SCHRÖDER**

Am Anfang ist das Gitter. Ganz gleich, ob man herausfinden will, wie stark sich die Erde durch den Klimawandel aufheizt, ob sich der Golfstrom abschwächen wird oder ob das arktische Meereis künftig im Sommer ganz verschwindet. Ohne Gitter geht so gut wie gar nichts. Zumindest nicht bei Klimamodellierern, die mit mächtigen Computerprogrammen versuchen, die Zukunft der Erde vorherzusehen. Denn die Klima- und Wetterphänomene auf der Erde sind so komplex, dass man sie nur häppchenweise analysieren kann. Die Modellierer überziehen den Globus deshalb mit einer Art mathematischem Netz aus quadratischen Maschen – den Gitterboxen. Bei weltweiten Klimamodellen hat so eine Gitterbox in der Regel eine Kantenlänge von etwa 100 Kilometern. So kommen für den ganzen Globus Tausende einzelner Gitterboxen zusammen. Und für jede Gitterbox berechnet das Klimamodell etliche physikalische Größen wie die Temperatur oder die Strahlungsleistung der Sonne – mit Formeln, die zum Beispiel die Strömung des Windes zwischen Hoch- und Tiefdruckgebieten beschreiben. Millionen einzelner Schritte sind nötig, um alle Gitterboxen durchzurechnen. Kein Wunder, dass Klimamodelle die Kraft von Großrechnern benötigen. Und selbst diese stoßen heute an ihre Grenzen.

Eine Auflösung von 100 Kilometer ist zu grob

Dr. Sergey Danilov weiß warum. „Eine Auflösung von 100 Kilometern und mehr ist in vielen Fällen zu grob, um die Klimaphänomene im Detail zu erfassen", sagt er. Denn auf einer Strecke von 100 Kilometern kann es recht starke klimatische Unterschiede geben. Das zeigt zum Beispiel der Harz: Der Westharz ist feucht, weil sich dort die Wolken abregnen. Der nur etwa 50 Kilometer entfernte Ostharz ist eher trocken, weil er im Windschatten des Mittelgebirges liegt und nur wenig Regen abbekommt. Eine Gitterbox von 100 Kilometern Breite kann solche Unterschiede gar nicht auflösen. Sergey Danilov nennt noch ein anderes Beispiel: Viele Klimamodelle haben Probleme damit, den Zugweg des Golfstroms naturgetreu nachzubilden. Der Golfstrom entspringt im Golf von Mexiko, wandert an der Küste Floridas gen Norden und zweigt dann nach Osten Richtung Europa ab. Viele Modelle aber können dieses Abbiegen nicht richtig darstellen, bei ihnen bewegt sich der Strom viel zu weit nach Norden. „Der Grund dafür ist, dass es im Ursprungsgebiet des Golfstroms viele kreisförmige Strömungen und Wirbel gibt, sogenannte Eddies, in denen sich Wassermassen aneinander vorbeischieben oder mischen", sagt Sergey Danilov. „Grobe Gitternetze können diese Phänomene nicht ausreichend genau darstellen."

Ideal wäre ein globales Gitternetz mit einer Maschenweite von nur zehn Kilometern oder weniger. Damit würde sich die Zahl der Einzelrechnungen aber potenzieren. Selbst für Klimasimulationen, die nur wenige Jahre überspannen, würde ein Großrechner Wochen benötigen. Das bremst die Forschung aus. Zudem müssen die Wissenschaftler für ihre Kalkulationen Zeiten auf Großrechenanlagen buchen, und die sind teuer.

Flexibel wie ein Einkaufsnetz

Ein extrem feinmaschiges Gitter von globaler Dimension bleibt damit bis auf weiteres ein frommer Wunsch. Sergey Danilov hat deshalb einen Mittelweg gewählt. Er hat mathematische Methoden entwickelt, mit denen er Gitternetze weben kann, die an verschiedenen Stellen unterschiedliche Maschenweiten haben. Damit kann er regional eine höhere Auflösung einstellen, ohne gleich →



das ganze globale Netz enger stricken zu müssen. Dieser Ansatz ähnelt einem gefüllten Einkaufsnetz. Dort, wo ein schwerer Gegenstand wie zum Beispiel eine Melone das Netz dehnt, weiten sich die Maschen. Dort wo die leichte Chipstüte ruht, liegen die Maschen enger. Für das Klimamodell und das globale Gitternetz heißt das, dass Sergey Danilov besonders komplexe Bereiche wie den Golfstrom mit einem feineren Gitternetz überziehen kann, während der übrige Atlantik von gröberen Maschen überzogen ist.

Ein Gitter für den ganzen Ozean

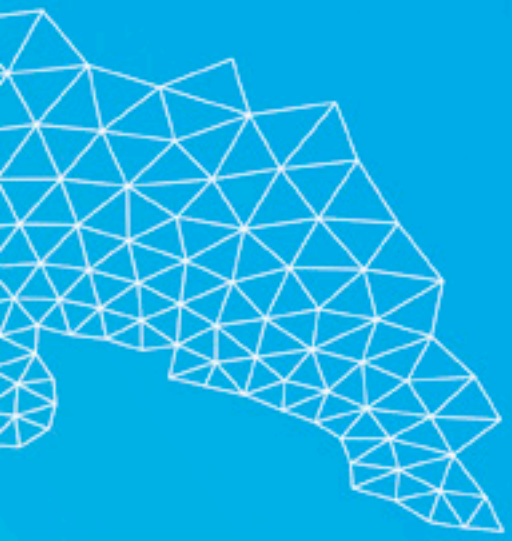
Für ein derart flexibles Netz musste sich Sergey Danilov von den klassischen quadratischen Gitterboxen verabschieden. „Man kann in einem Gitternetz nur schwer quadratische Gitterboxen mit verschiedenen Größen beziehungsweise Auflösungen nebeneinander legen", sagt der AWI-Mathematiker, „weil dabei harte Übergänge entstehen, die geometrisch schwierig zu fassen sind und bei der Berechnung der Klimaparameter keine fließenden Übergänge erlauben." Er nutzt daher ein Netzwerk, das aus kleinen Dreiecken besteht, die sich beliebig deformieren lassen und damit sanfte Übergänge wie beim Einkaufsnetz ermöglichen. Mathematiker bezeichnen solche Netze, die mit Dreiecken oder anderen geometrischen Figuren arbeiten, als „unstrukturierte Gitter". Im Hinblick auf das Meer wurden sie erstmals in den 1980er-Jahren von niederländischen Küsteningenieuren eingesetzt, die die Strömungen entlang der Küste, an Deichen, Schleusen oder Wehren ermitteln wollten. „Wir sind die ersten, die unstrukturierte Gitter auf den gesamten Ozean übertragen, um an gewünschten Stellen Klimaprozesse oder verwandte Phänomen zu modellieren", sagt Sergey Danilov.

Sergey Danilov führt selbst nur selten umfangreiche Klimamodellierungen durch. Er ist vielmehr der mathematische Kopf, der seinen Kollegen das Werkzeug zur Verfügung stellt; dem Klimamodellierer Dr. Helge Gößling zum Beispiel: „Wir arbeiten seit einiger Zeit daran, die Veränderung der Meereisbedeckung in der Arktis über Wochen

413 300 000 000 000

RECHENOPERATIONEN PRO SEKUNDE

schafft der neue Supercomputer vom Typ CRAY CS400, den das AWI-Rechenzentrum seit April 2016 betreibt. Dank seiner Leistung können AWI-Wissenschaftler größere Rechnungen wie zum Beispiel zur arktischen Meereisbedeckung und zur Ozeanzirkulation direkt im am AWI durchführen und müssen nicht mehr auf Großrechner im In- und Ausland ausweichen.



oder gar bis zu Jahrzehnten vorherzusagen, dabei spielen regionale Phänomene wie der Warmwassereinstrom durch die Framstraße zwischen Grönland und Spitzbergen eine Rolle." Und diese will Helge Gößling künftig mit den unstrukturierten Gittern genauer modellieren.

Fast so schnell wie klassische Modelle

Die Mathematiker um Sergey Danilov sind nach mehreren Jahren der Entwicklung auf einem vielversprechenden Weg. Die Berechnung der unstrukturierten Gitter dauert zwar noch etwas länger als beim klassischen Schachbrettmuster. Doch sie holen auf. Sie verbessern ihre Algorithmen laufend, sodass die Rechenzeit bei Standard-Klimasimulationen nur noch etwa doppelt so lang ist wie bei den etablierten Verfahren. „Das ist bemerkenswert, denn noch vor wenigen Jahren brauchten wir ein Vielfaches der Zeit", sagt Sergey Danilov.

Damit mausern sich die unstrukturierten Gitter zur echten Alternative. Die Forscher konnten bereits zeigen, dass sie den Golfstrom sehr gut simulieren können. Und auch die Veränderung der Wasseroberflächen-Temperaturen im Südpolarmeer können die unstrukturierten Gitter sehr realitätsnah darstellen. So stimmen die neusten Berechnungen mit den Werten realer Messungen erstaunlich gut überein.

Ein Werkzeug für die Welt

Derzeit kommt dieses ungewöhnliche Modell mit dem Namen FESOM bereits beim weltweiten Vergleich der Klimarechenmodelle zum Einsatz – dem Coupled Model Intercomparison Project – dessen Ergebnisse in den nächsten Bericht des Weltklimarats einfließen. Sergey Danilov, Helge Gößling und weitere AWI-Kollegen sind gespannt, inwieweit sich ihre Rechnungen mit denen anderer Modelle decken. So könnte sich herausstellen, dass die realistischere Darstellung wichtiger Meeresregionen mithilfe der unstrukturierten Gitter ganz neue Aussagen über die Zukunft liefern. Aktuell wollen die AWI-Wissenschaftler ihr Simulationswerkzeug über das Internet auch anderen Forschern zur Verfügung stellen – als eine Art Strickmuster, mit dem Klimamodellierer weltweit ihre Gitternetze neu weben können. //

KOMPAKT

- **Mit „unstrukturierten Gittern" kann die Auflösung von Klimamodellen flexibel für beliebige Gebiete der Erde verfeinert werden.**
- **Das AWI-Simulationswerkzeug „FESOM" wird künftig Klimamodellierern weltweit zur Verfügung stehen und Daten für die Berichte des Weltklimarats liefern.**
- **Der Rechenaufwand für die unstrukturierten Gitter verringert sich laufend und ist inzwischen kaum noch größer als der für klassische Verfahren.**



Oben: Lange glaubten Biologen, dass die Buckelwale des Südpolarmeeres zum Ende des Sommers Richtung Äquator wandern. AWI-Forscherin Ilse van Opzeeland (rechts) und ihr Team konnten mithilfe ihrer Tonaufnahmen aus dem Weddellmeer beweisen, dass ein Teil der Population in der Antarktis überwintert.



Der Sound des Ozeans

Mit Unterwasser-Rekordern erforscht die AWI-Biologin Ilse van Opzeeland eine einzigartige Geräuschkulisse im Südpolarmeer. Die Aufnahmen verraten, wann sich Wale und Robben wo aufhalten. Aber nicht alle Geräusche stammen von Tieren.



Text: **SEBASTIAN GROTE**

Wenn Dr. Ilse van Opzeeland über den Soundtrack ihres Lebens nachdenkt, fallen ihr die Laute von Blauwalen, Seeleoparden oder Krabbenfresserrobben ein. Schon für ihre Doktorarbeit hat die Meeresbiologin wochenlang in das Südpolarmeer hineingehorcht. Die Geräusche wurden von akustischen Observatorien Hunderte Meter unter der Meeresoberfläche aufgenommen. Minute für Minute fügen sich die Sounddateien wie Puzzleteile zu einer einzigartigen Geräuschkulisse zusammen. Eigentlich, so Ilse von Opzeeland, seien visuelle Beobachtung die klassische Methode, um Vorkommen und Verhalten von Meeressäugetieren zu studieren. „Doch da, wo wir mit unseren Augen nicht hinkommen, erschließen Hydrophone eine faszinierende Welt", sagt die Biologin.
Dass sie einmal Soundexpertin für die Polarmeere wird, war keine gezielte Berufswahl. Mit dieser besonderen Art der Verhaltensforschung ist Ilse van Opzeeland zum ersten Mal →

10 730
MINUTEN

Tonmaterial hat AWI-Forscherin Ilse van Opzeeland für ihre Doktorarbeit ausgewertet. Die Aufnahmen stammten von Hydrophonen, die in der Nähe der deutschen Antarktis-Forschungsstation Neumayer III die Geräuschkulisse des Weddellmeeres aufgezeichnet hatten.

während ihres Masterstudiums im norwegischen Tromsø in Verbindung gekommen. „Das war damals genau das, wonach ich gesucht hatte. Bei dieser schonenden Forschungsmethode muss man gar nicht mit den Tieren in Berührung kommen. Wir sammeln unsere Daten und sie merken überhaupt nicht, dass wir da waren", sagt die Meeresbiologin.

Schon seit den 1960er Jahren halten Menschen Hydrophone in das Wasser, um den Geräuschen von Meeressäugern zuzuhören. Doch erst seit jüngster Zeit sind die Speicherkarten und Akkus so leistungsstark, dass die Geräte über einen Zeitraum von einem Jahr und länger am Stück unter Wasser aufzeichnen können. Dadurch eröffnen sich ganz neue Möglichkeiten für Wissenschaftler wie Ilse van Opzeeland. „Über das Leben im Südpolarmeer ist erst so wenig bekannt und lange Zeit gab es nur Beobachtungen während der Sommermonate. Dank der autonomen Rekorder können wir nun das ganze Jahr mit unseren ‚Ohren' vor Ort sein – sogar dann, wenn sich im Winter Eis über das Meer legt und kein Schiff mehr in diese Region kommt", betont die Meeresbiologin.

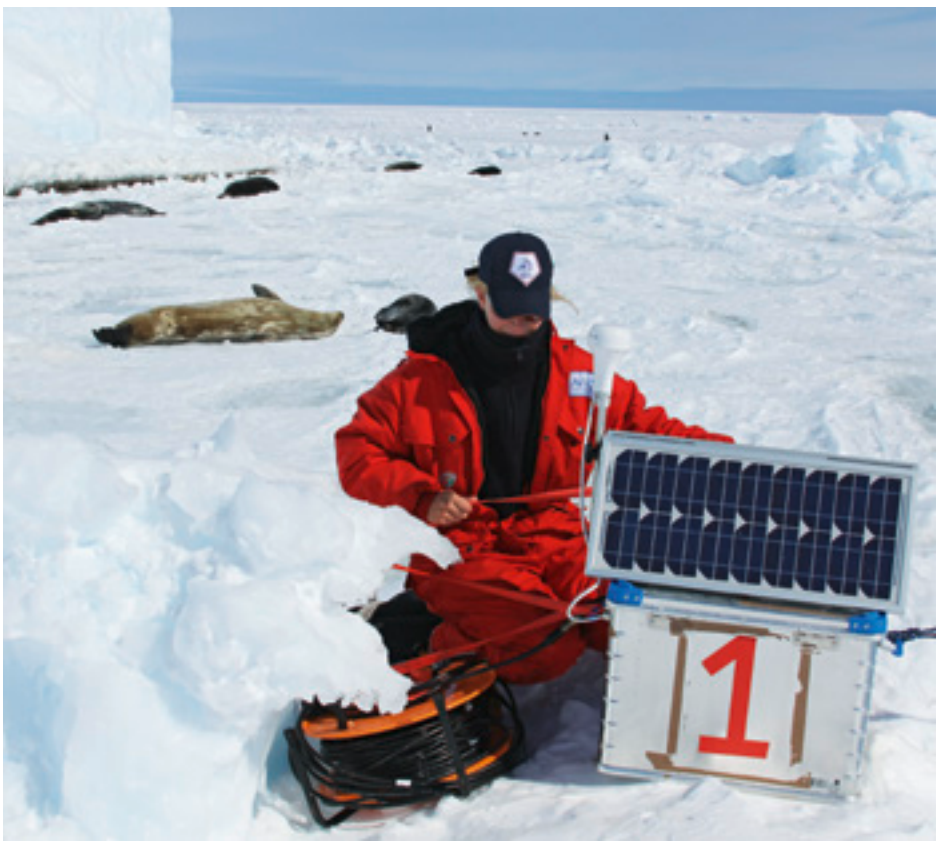
Der Chor der Meeressäugtiere hat viele Stimmen. Er reicht vom esoterischen Pfeifen der Weddellrobben über das Trillern und Gurgeln der Seeleoparden bis hin zu Blauwalen, deren tiefer Bass auch noch aus einer Entfernung von über 100 Kilometer aufgezeichnet wird. Ilse van Opzeeland ist davon immer wieder begeistert, denn Blauwale wurden so stark gejagt, dass vor einigen Jahrzehnten nur noch ein Prozent ihrer ursprünglichen Population lebte.

Ein Team aus acht Wissenschaftlern und Technikern in der Gruppe „Ozeanische Akustik" erarbeitet am Alfred-Wegener-Institut Methoden, um die Klangkulisse in den polaren Gewässern zu erforschen. Ilse van Opzeeland hält das Südpolarmeer für eine akustisch sehr spannende Region. Bei der Auswertung der Aufnahmen stößt sie immer wieder auf Überraschungen. So war es etwa die verbreitete Meinung, dass Buckelwale nur bis 60 Grad Süd wandern und sich im Winter wieder in wärmere Gewässer weiter nördlich bewegen. „Mit unseren Aufnahmen konnten wir belegen, dass sich die Buckelwale das ganze Jahr im Südpolarmeer aufhalten und dabei viel weiter in den Süden ziehen als bisher angenommen", betont die Biologin.

Bei einigen Geräuschquellen haben die Wissenschaftler überhaupt erst rausgefunden, worum es sich handelt. Antarktische Zwergwale zum Beispiel geben sehr mysteriöse kurze, dumpfe Töne von sich, die ein bisschen an Science-Fiction-Filme vergangener Zeiten erinnern. Bis vor Kurzem noch konnten diese Geräusche keiner Quelle eindeutig zugeordnet werden. Es gab die wildesten Hypothesen – bis hin zu der Annahme, dass es sich dabei um U-Boote handeln müsse.

Ilse van Opzeeland kann mittlerweile auf einen großen Erfahrungsschatz zurückgreifen, wenn ein neuer Rekorder zur Auswertung in ihrem Büro landet. „Während meiner Doktorarbeit habe ich ständig einen Livestream aus dem Südpolarmeer gehört. Dadurch habe ich viele der Geräusche verinnerlicht", sagt die AWI-Wissenschaftlerin.

Sie interessiert sich aber nicht nur für die Laute von Tieren, denn die Soundkulisse in den Polarmeeren hat noch viel mehr zu bieten. „Wir erfassen auch abiotische Geräusche – wie zum Beispiel das dumpfe Krachen abbrechender Eisberge. Das alles ist noch Teil unserer



Für kurze Einblicke in die Klangwelt unter dem Meereis nutzt AWI-Biologin Ilse van Opzeeland die Einstiegs- oder Atemlöcher der Weddellrobben. Da die Tiere diese Löcher stets offen halten, kann die Wissenschaftlerin hier ohne zeitraubendes Bohren ihre Unterwassermikrofone unter dem Eis platzieren.

Forschung, da es zu der Geräuschkulisse gehört, in der sich die Tiere aufhalten und die somit auch einen Einfluss auf sie hat", erklärt die Biologin.

Wenn sich im Winter etwa Meereis bildet, wirkt es wie eine schallisolierende Schicht. Sie dämmt den Wind und in den Gewässern wird es sehr viel leiser. Das wiederum vergrößert die Rufweite der Tiere. Unterwassergeräusche sind die Hauptinformationsquelle für Meeressäuger. Mit Hilfe akustischer Signale finden sie Partner und Beute oder gehen Feinden aus dem Weg. Je leiser es im Ozean ist, desto besser funktioniert die Kommunikation.

Ilse van Opzeeland ist sich sicher, dass solche akustischen Aufzeichnungen in Zukunft wesentlich zum Management von Meeresschutzgebieten beitragen können. Rekorder, die das ganze Jahr über aufzeichnen, ermöglichen ein deutlicheres Bild der Geräuschkulisse, die auch durch menschliche Aktivitäten wie die Schifffahrt geprägt ist. Noch wichtiger sei aber das grundsätzliche Verständnis, wie sich die Tierwelt in den Polarregionen – etwa durch die Zunahme oder den Rückgang des Meereises – verändert. „Erst wenn wir diese Daten haben", betont die Biologin, „können wir richtige und effektive Schutzmaßnahmen entwickeln. Heute stehen wir damit noch ganz am Anfang." //

KOMPAKT

- **Mit Hilfe batteriebetriebener Unterwasser-Rekorder – sogenannten Hydrophonen – können Wissenschaftler das ganze Jahr lang die Polarmeere akustisch beobachten, ohne selbst vor Ort zu sein.**
- **In den Ozeanen hört man die Laute von Walen und Robben, aber auch Geräusche von Wind und Eis. Außerdem prägen immer häufiger Menschen die Geräuschkulisse – zum Beispiel durch Schifffahrt.**
- **Akustische Beobachtungen helfen Wissenschaftlern dabei zu verstehen, wann und wo sich Säugetiere im Ozean aufhalten. Deshalb sind diese Daten auch wichtig für die Einrichtung und Beobachtung von Meeresschutzgebieten.**



Zum Zooplankton des Südpolarmeeres gehören auch Kleinstlebewesen wie der antarktische Küstenkrill (Euphausia crystallorophias).

DER SCHALL VERRÄT DIE KREBSTIERE



Drei Fragen an den AWI-Ozeanographen Dr. Volker Strass. Er untersucht das Zooplankton des Südpolarmeeres mit Schallwellen

Warum lohnt es sich, Zooplankton akustisch zu beobachten?

Durch unsere akustischen Messungen können wir zeigen, wann sich das Zooplankton wo aufhält. Vom millimeterkleinen Ruderfußkrebs bis hin zum Krill ist es nämlich ganz zentral für das Nahrungsnetz in den Ozeanen. Zooplankton bildet das Bindeglied zwischen Phytoplankton – etwa Algen, die über Photosynthese überhaupt erst die Grundlage für das Leben im Meer schaffen – und größeren Tieren. Somit beeinflusst es auch die Fischereierträge.

Kann man Krill und Ruderfußkrebse wirklich hören?

Leider nein. Anders als bei der akustischen Erforschung von Meeressäugern messen wir deshalb nicht die Laute der Tiere selbst, sondern das zurückgestreute Echo. Dafür nutzen wir akustische Doppler-Strömungsmesser, die in regelmäßigen Zeitintervallen Schallwellen aussenden und die Rückstreuung wieder einfangen. Auf diese Weise lernen wir etwas über die Konzentration des Zooplanktons und über seine Wanderungsgeschwindigkeit. Wir haben durch Aufnahmen an drei Positionen im östlichen Weddellmeer einen Tagesrhythmus der Tiere entdeckt.

Was verraten die Aufnahmen über den Alltag der Tiere?

Tagsüber verschwinden sie in der Regel in die Tiefe; nachts kommen sie wieder an die Oberfläche. Dort fressen sie dann im Schutz der Dunkelheit Algen. Wir gehen davon aus, dass die Tiere durch diese tägliche Wanderung ihren Fressfeinden ausweichen. Dabei verfügen sie offensichtlich über eine innere Uhr, wie unsere Beobachtungen südlich des Polarkreises zeigen. Denn hier setzen sie die vertikale Wanderung auch in der Polarnacht fort. Das konnten wir mit den hydroakustischen Messungen zum ersten Mal zeigen. Außerdem haben wir festgestellt, dass das Zooplankton im Südsommer die Wanderung mehr oder weniger ganz einstellt – wahrscheinlich, um sich dann ganz dem Fressen an der Meeresoberfläche zu widmen.



Der Forschungseisbrecher Polarstern fährt in jedem Sommer in die Framstraße, damit die AWI-Ozeanographen ihre Messdaten einsammeln können.

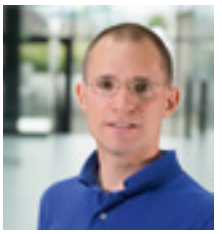
Der Wärme-Pulsschlag des Nordatlantiks

Die Zukunft des Arktischen Ozeans entscheidet sich auch in der Framstraße. Durch das Seegebiet zwischen Grönland und Spitzbergen strömt nämlich warmes atlantisches Wasser Richtung Norden. Wie viel davon wirklich in der Arktis ankommt und welche verschlungenen Pfade die Wärme nimmt, untersuchen AWI-Ozeanograph Wilken von Appen und sein Team.

Text: **SINA LÖSCHKE**

Den Moment, in dem das akustische Auslösesignal Richtung Meeresboden gefunkt wird, hat Wilken von Appen schon dutzende Mal erlebt. Dennoch kann sich der AWI-Ozeanograph nicht entspannt auf der Brücke des deutschen Forschungseisbrechers Polarstern zurücklehnen und abwarten. Zu viel steht auf dem Spiel. Sollte in weniger als 60 Sekunden nicht eine Handvoll gelber und orangefarbener Auftriebskörper mit einem Verankerungsseil im Schlepptau an der Meeresoberfläche auftauchen, wären die Messergebnisse eines ganzen Jahres in Gefahr – und Forschungstechnik im Wert mehrerer Kleinwagen verloren.

45 Sekunden … 50 Sekunden. Nichts. Wilken von Appen sucht mit dem Fernglas die Meeresoberfläche ab. Im Hinterkopf spielt er schon mal die verschiedenen Suchszenarien durch. Vielleicht hat sich das mehr als zwei Kilometer lange Plastikseil mit den Messgeräten irgendwo unter einer der Eisschollen verfangen? Rund um das Schiff treiben genügend. Die Wissenschaftler könnten in diesem Fall einen Tauchroboter mit Kamera →



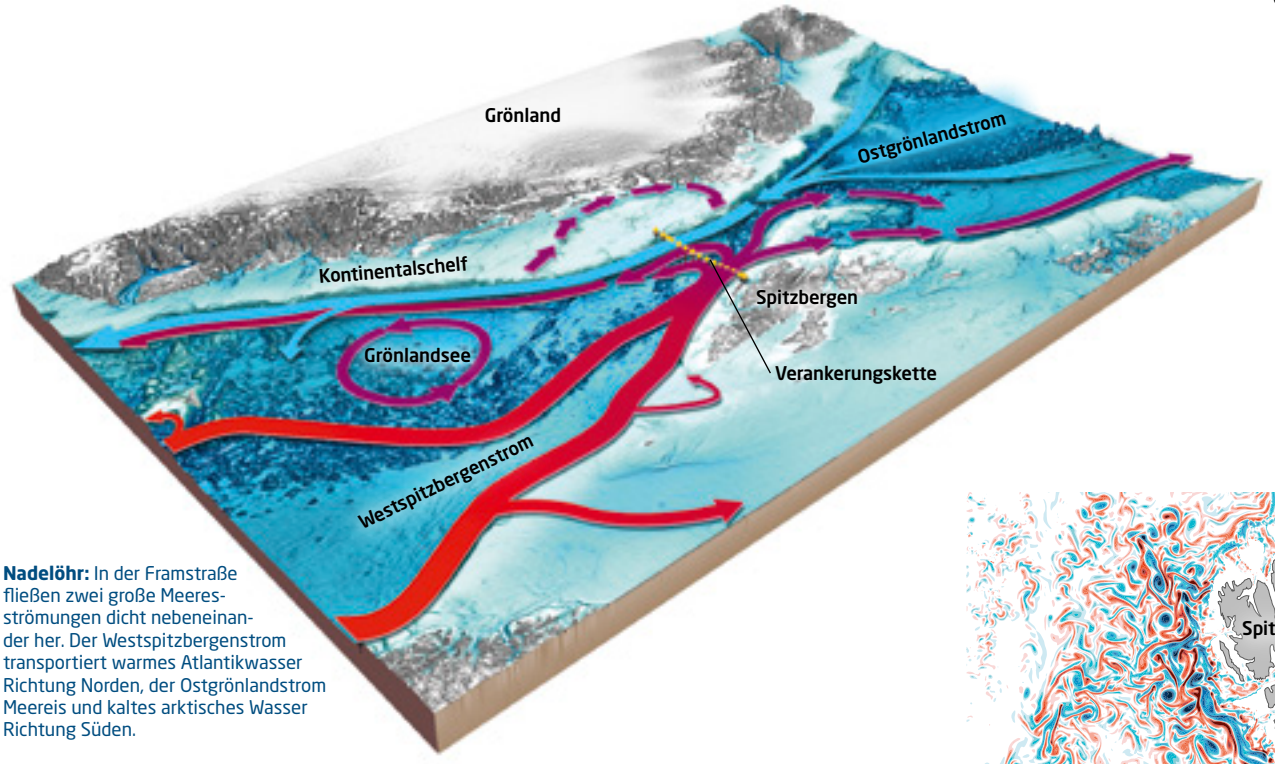
Dr. Wilken von Appen
Die Physik der Meeresströmungen fasziniert den Ozeanographen seit dem Grundstudium. Er möchte u.a. herausfinden, durch welche Prozesse sich Wassermassen teilen.



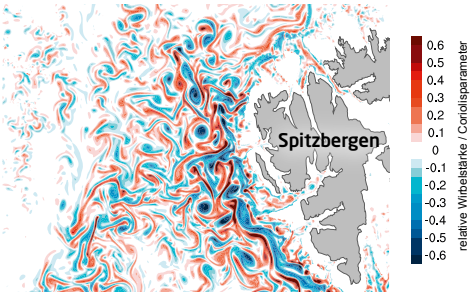
Verankerung gesichtet! Zwei Auftriebskörper einer ozeanografischen Messkette treiben zwischen den Eisschollen in der Framstraße. Zwölf Monate lang haben sie das am Meeresboden verankerte Seil mit den Temperatur- und Strömungsmessgeräten senkrecht in der Wassersäule gehalten. Jetzt kam das Signal zum Auftauchen.



Dutzende Auftriebskörper werden für jene Messketten gebraucht, die bis in eine Tiefe von 2 500 Meter hinabreichen. Um zu verhindern, dass sie sich beim Aussetzen verknoten, legen Wissenschaftler und Schiffsbesatzung die Ketten vorher auf dem Deck Polarsterns aus.



Nadelöhr: In der Framstraße fließen zwei große Meeresströmungen dicht nebeneinander her. Der Westspitzbergenstrom transportiert warmes Atlantikwasser Richtung Norden, der Ostgrönlandstrom Meereis und kaltes arktisches Wasser Richtung Süden.



Erkenntnis aus der Modellierung: Der Westspitzbergenstrom bildet in der Framstraße viele kleine Wirbel, die das Ausbrechen einiger Wassermassen aus dem Hauptstrom ermöglichen.

zu Wasser lassen und nach der Messkette suchen. Schwieriger wäre es, wenn die Auslösevorrichtung den Anker der senkrecht in der Wassersäule stehenden Verankerungskette erst gar nicht freigegeben hätte. Die drei schweren Eisenbahnräder mit der Auslösevorrichtung liegen in 2 500 Meter Tiefe auf dem Meeresboden – zu tief für den Roboter.

Eingangstor in den Arktischen Ozean

Die Verankerung gehört zu einem der wichtigsten Langzeitprojekte des Alfred-Wegener-Institutes. Seit dem Jahr 1997 überwachen AWI-Ozeanographen in der Framstraße, dem Meeresgebiet zwischen Spitzbergen und der Nordostküste Grönlands, den Pulsschlag des atlantischen Strömungssystems. „Die Framstraße spielt für uns aus drei Gründen eine wichtige Rolle. Erstens stellt sie eines von zwei Eingangstoren dar, durch die der Atlantische Ozean Wasser und Wärme in den Arktischen Ozean transportiert. Die Wärme führt dort unter anderem zur Meereisschmelze. Wenn wir zum Beispiel wissen wollen, wie viel Wärme der Atlantik in den Arktischen Ozean transportiert, müssen wir an diesen beiden Punkten messen“, sagt Wilken von Appen.

Zweitens ist die Framstraße ein wichtiges Gebiet für die globale Meereszirkulation. Auf seinem Weg nach Norden gibt das relativ salzige atlantische Oberflächenwasser große Mengen Wärme an die Atmosphäre ab, wodurch es kälter und dichter wird. In der etwa 600 Kilometer breiten Framstraße sinkt das Wasser auf eine Tiefe von 200 bis 800 Meter ab und fließt an der östlichen Schelfkante Grönlands entlang zurück Richtung Süden. Südlich von Island stürzt es dann in gigantischen Wasserfällen in die Tiefseebecken des Nordatlantiks. Klimaforscher nennen diese Umwälzung „Konvektion“ und schenken der Tiefenwasserbildung viel Beachtung. Denn: Eine Hälfte des Golfstroms, der mit seiner Kraft viel Wärme aus den Tropen Richtung Mittel- und Nordeuropa transportiert, ist Teil dieser Umwälzzirkulation – und wenn sich ein →



Diese Illustration verdeutlicht, warum die ozeanographische Messkette (rechts) im Forscherdeutsch „Verankerung“ genannt wird. Ein Anker aus drei Eisenbahnrädern hält sie am Meeresboden fest. Zwischen den Auftriebskörpern hängen in unterschiedlichen Tiefen die Temperatur- und Strömungsmessgeräte.

„In der Framstraße, dem Tor zur Arktis, passiert im Moment besonders viel, denn sie ist die wichtigste Passage für warmes Wasser aus dem Nordatlantik. Für meine Arbeit setze ich aus allen verfügbaren Temperaturdaten der letzten vier Jahrzehnte ein großes Puzzle zusammen. Damit großflächigen Veränderungen auf die Spur zu kommen, ist eine faszinierende Aufgabe."



DR. AXEL BEHRENDT
Ozeanograph

DARUM LIEBE ICH MEINEN JOB

Detail entlang des Weges dieses Förderbandes ändert, könnte sich dadurch das gesamte System verändern.
Der dritte Grund für den AWI-Fokus auf die Framstraße ist der Rückzug der Gletscher an der Ostküste Grönlands. „Wir vermuten, dass diese Gletscher nicht nur schrumpfen, weil die Luft wärmer wird, sondern weil warmes Atlantikwasser aus der Framstraße unter ihre Eiszungen gelangt und die Eismassen von unten schmilzt. Wir untersuchen am Beispiel des 79°-Nord-Gletschers, auf welchem Wege sich das warme Wasser aus der Framstraße seinen Weg unter den Gletscher bahnt", sagt Wilken von Appen.

Ein Anstieg von ein Grad Celsius

Ob Tiefenwasserbildung oder Gletscherschmelze – Ausgangsbasis jeder Forschungsfrage ist der mehr als 20 Jahre umfassende Datensatz des sogenannten Verankerungsschnittes. Er besteht aus 16 Einzel-Verankerungen, welche AWI-Wissenschaftler gemeinsam mit norwegischen Kollegen im Abstand von zehn bis 30 Kilometer nebeneinander ausgesetzt haben. Aufgereiht wie an einer Perlenschnur reicht diese Observatoriumskette auf etwa 79 Grad Nord einmal quer über den 300 Kilometer breiten tiefen Teil der Framstraße. Sie misst an 365 Tagen im Jahr die Temperatur, die Strömungsgeschwindigkeit und den Salzgehalt der ein- und ausströmenden Wassermassen.
„Das Strömungssystem der Framstraße ähnelt an seiner Oberfläche einer Hauptstraße. Auf der rechten Spur fließt etwa drei bis sechs Grad Celsius warmes, salziges atlantisches Wasser im Westspitzbergenstrom Richtung Norden. Auf der linken Spur dagegen wandern minus 1,8 Grad Celsius kaltes, relativ salzarmes Wasser und Meereis im Ostgrönlandstrom aus der Arktis in den Nordatlantik", sagt Wilken von Appen. Zwischen beiden Spuren gibt es dann Wegegabelungen, an denen Teile des atlantischen Wassers Richtung Westen abbiegen, um sich unter den Gegenstrom einzuordnen. Der Rest fließt weiter geradeaus in den Arktischen Ozean."
Dieses System transportiert heute deutlich wärmeres Wasser in die Arktis als zu Beginn der Messungen. „Die Wassermassen

Die Wassermassen des Westspitzbergenstroms sind heute im Durchschnitt ein Grad Celsius wärmer als im Jahr 1997.

des Westspitzbergenstroms sind heute im Durchschnitt ein Grad Celsius wärmer als im Jahr 1997. Das bedeutet, dass auch jene Wassermassen wärmer geworden sind, die den Westspitzbergenstrom Richtung Grönland verlassen und in Teilen bis vor die Gletscher gelangen. Eine Veränderung mit weitreichenden Konsequenzen für die grönländischen Eismassen", sagt Wilken von Appen.
Zu spüren ist ein Temperaturanstieg auch in der Tiefe. „Die Umwälzung der Wassermassen in der Grönlandsee erfolgt nicht mehr bis zum Meeresboden, sondern das Wasser wird nur noch in Tiefen von weniger als 1 000 Meter durchmischt. Welche Implikationen diese Veränderung für das atlantische Strömungssystem hat, ist bisher noch nicht abzusehen", so Wilken von Appen.

Das Rätsel der kleinen Wirbel

Er hat sich in den zurückliegenden Jahren darauf konzentriert, herauszufinden, welche Kräfte das Atlantikwasser aus dem Westspitzbergenstrom Richtung Westen wandern lassen. Beim genaueren Hinsehen nämlich erweist sich die Physik des Meerwassers als schwer durchschaubare Materie mit so manchem Scheinwiderspruch. Von Appens Lieblingsbeispiel dafür ist die Erkenntnis, dass sich verschiedene Wassermassen von allein eigentlich nicht mischen. „Temperaturunterschiede und Unterschiede im Salzgehalt zweier Wassermassen lassen Schichten und Fronten entstehen, die nur schwer zu durchbrechen sind. Das heißt in einer Strömung fließt das Wasser im Grunde wie in einem Wasserrohr. Ein Ausbrechen nach links oder



Das Ein- und Aussetzen der Messketten ist harte körperliche Arbeit und wird an Bord des FS Polarstern im Team verrichtet. Wissenschaftler und Schiffsbesatzung packen gemeinsam an.

6 600 000

KUBIKMETER WASSER

transportiert der Westspitzbergenstrom im Durchschnitt pro Sekunde durch die Framstraße Richtung Norden. Mit dieser Wassermenge gelänge es rein rechnerisch, den großen Bodensee in gerade mal zwölf Minuten komplett zu füllen.

rechts ist im Grunde nicht vorgesehen", so der AWI-Wissenschaftler.

Und trotzdem beobachten die AWI-Forscher in der Framstraße, dass sich Wassermassen teilen. „Ermöglicht werden sie durch Wirbel im Westspitzbergenstrom. Sie haben einen Durchmesser von einigen Kilometern und reichen meist mehrere hundert Meter tief, in manchen Fällen sogar bis zum Meeresboden", so Wilken von Appen. Und wo Wasser sich dreht, werden auch Fronten instabil. „Auf diese Weise entsteht zum einen die Westströmung in der Framstraße. Der gleiche Mechanismus ist unserer Meinung nach aber auch der Grund, warum es dem warmen und schweren Atlantikwasser gelingt, sich unter das eiskalte Wasser im Ostgrönlandstrom zu schieben", sagt Wilken von Appen.

In den Ozean-Computermodellen seiner AWI-Kollegen Dr. Claudia Wekerle und Dr. Tore Hattermann kann Wilken von Appen mit eigenen Augen sehen, wie diese Wirbel vermutlich aussehen. Sie aber auf hoher See nachzuverfolgen und die wissenschaftliche Hypothese zu bestätigen, ist eine ganz andere Herausforderung. „Als Teil der großen AWI Infrastrukturinitiative FRAM haben wir im Sommer 2016 neue Verankerungen genau an jenen Stellen ausgelegt, an denen dem Modell zufolge ein Teil des Atlantikwassers Richtung Westen abdreht. Bisher gehen wir von zwei solcher Wendemarken aus. Unsere Messdaten müssen diese Annahme aber erst noch bestätigen", so Wilken von Appen.

Wenn es nur nicht zu nervenaufreibend wäre, diese Daten zu bergen. 1:05 Minuten sind seit dem Aussenden des Funksignals vergangen. „Auftrieb gesichtet", ruft plötzlich der diensthabende Offizier und zeigt mit dem Finger auf ein paar Eisschollen, die längsseits des Forschungseisbrechers treiben. Wilken von Appen atmet kurz durch und schaltet auf Autopilot: Bergung protokollieren, Messgeräte reinigen, Daten auslesen und kontrollieren, vielleicht sogar erste schnelle wissenschaftliche Erkenntnisse – sein Arbeitspensum für die nächsten 48 Stunden steht fest. Und das war erst Nummer eins von mehr als 20 Verankerungen! //

KOMPAKT

- **Die Framstraße zwischen Ostgrönland und Spitzbergen ist eines von zwei Eingangstoren, durch die atlantisches Wasser in den Arktischen Ozean fließt.**
- **Das atlantische Wasser ist heute ein Grad Celsius wärmer als im Jahr 1997 und transportiert somit wahrscheinlich mehr Wärme in den Arktischen Ozean.**
- **Ein Teil des atlantischen Wassers biegt in der Framstraße ab und gelangt vor die Gletscher an der grönländischen Ostküste. Die AWI-Ozeanographen untersuchen derzeit, ob seine Wärme eine Ursache für den großflächigen Gletscherrückzug ist.**

WOHIN

wandert der Rieseneisberg vom Larsen C-Schelfeis?

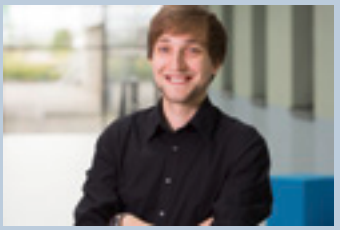


Ein Tafeleisberg treibt durch das Amundsenmeer. Am Anfang seiner Reise ist die Abbruchkante des Eisklotzes noch relativ gerade. Mit der Zeit aber nagen die Wellen an ihm und höhlen ihn auf Höhe der Wasserlinie aus. Infolgedessen zerbricht er dann in kleinere Teile.



Wenn ein Eisberg durch das Südpolarmeer treibt, bestimmt nicht der Zufall seinen Kurs, sondern in erster Linie sein Gewicht. Abhängig von ihrer Größe bewegen sich die weißen Kolosse nämlich auf ziemlich festen Pfaden, wie AWI-Klimaforscher Thomas Rackow herausgefunden hat. Ein Gespräch über zerberstendes Eis, rutschende Giganten und einen einsamen Wanderer namens A68.

Interview: **SINA LÖSCHKE**



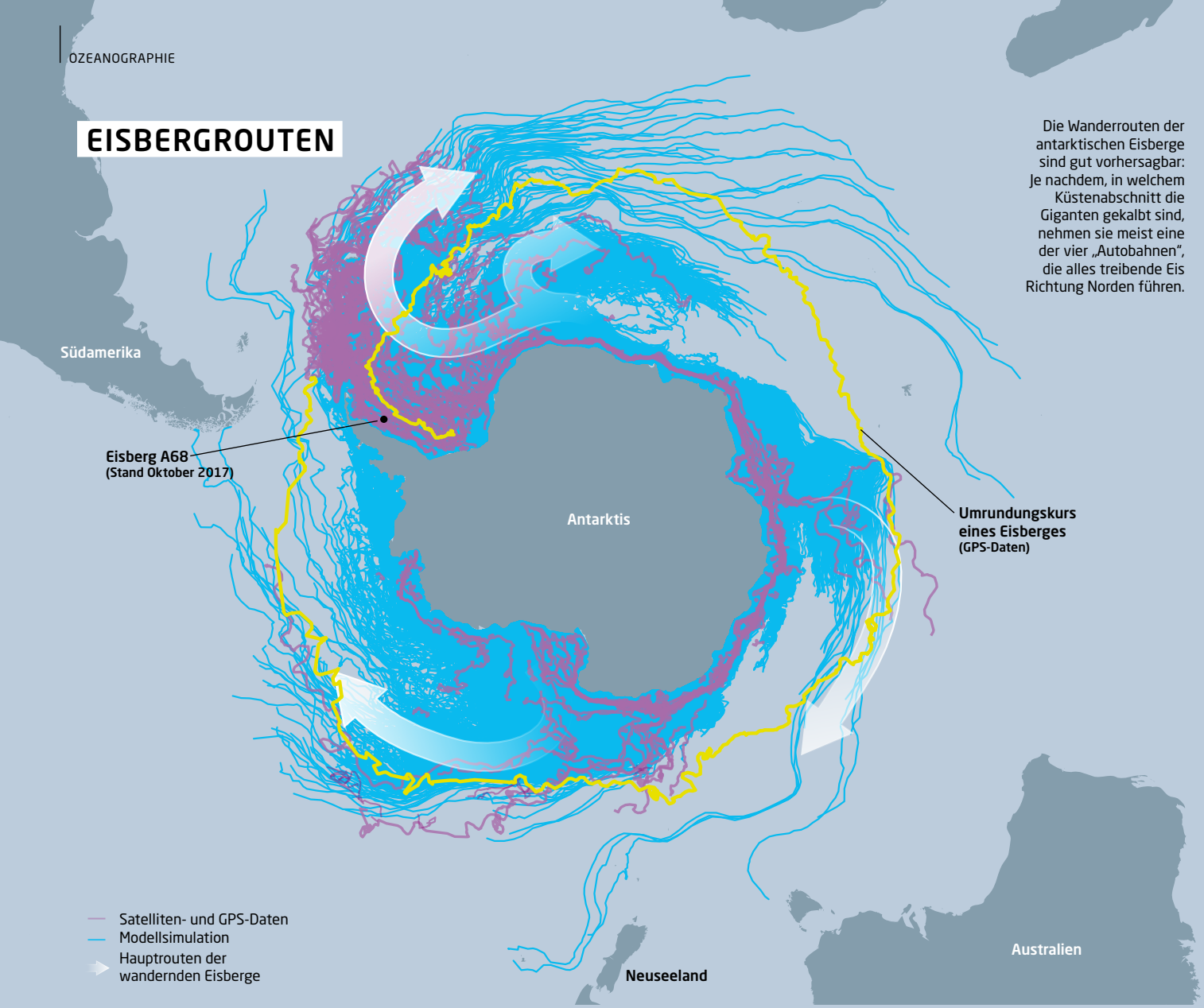
Dr. Thomas Rackow
Der Klimamodellierer hat die Reise Tausender Eisberge im AWI-Klimamodell nachverfolgt und so ihre Hauptrouten identifiziert.

Im Juli 2017 ist ein Eisberg vom Larsen C-Schelfeis abgebrochen, der 5 800 Quadratkilometer groß war. Zeitungen und Nachrichtenportale auf der ganzen Welt berichteten. Haben Sie dieses Ereignis auch als Sensation erlebt?

Thomas Rackow: *Wenn ein Eisberg kalbt, ist das im Grunde ein natürlicher Vorgang, der zum Lebenszyklus eines antarktischen Schelfeises dazugehört. Was den Abbruch dieses Eisberges so besonders macht, ist seine schiere Größe. Das Larsen C-Schelfeis ist das viertgrößte Schelfeis der Antarktis und hat mit einem Schlag zehn Prozent seiner Fläche verloren. Mit einem Ausmaß von 5 800 Quadratkilometern ist A68, wie dieser Eisberg genannt wurde, sechseinhalb mal so groß wie das Stadtgebiet Berlins und speichert mehr Süßwasser als die Bevölkerung der USA in einem Jahr zu trinken vermag. Die Dimensionen sind also gigantisch. Dennoch gab es in der Vergangenheit schon Eisberge, die ihn in den Schatten stellen. Das prominenteste Beispiel ist sicherlich der Tafeleisberg B15. Er löste sich im Jahr 2000 vom Ross-Schelfeis und war damals 11 600 Quadratkilometer groß – also doppelt so groß wie A68.*

Aus welchen Gründen beobachtet die Wissenschaft die Entstehung großer Eisberge so akribisch?

Thomas Rackow: *Durch den Abbruch eines Eisberges verliert ein Schelfeis auf einen Schlag eine ganze Menge Eis, was weitreichende Konsequenzen haben kann.* →



Um sie zu verstehen, muss man wissen, dass Schelfeise die schwimmenden Ausläufer eines oder mehrerer Gletscher sind. Ihr Eis hat also eine lange Reise vom Hochplateau im Landesinneren, den Gletscher hinunter bis zum Meer hinter sich. Wenn es dann als große Eisplatte aufschwimmt und auf das Meer hinausgeschoben wird, bleibt es hier und da an Inseln oder großen Felsen hängen, wodurch das Nachrutschen weiterer Eismassen von Land gebremst wird. Löst sich nun aber ein großes Stück des Schelfeises, büßt die Eisplatte insgesamt einen Teil ihrer Bremskraft ein. Das heißt, die dahinter liegenden Gletscher beschleunigen ihr Fließtempo und tragen mehr Eis in das Meer, wodurch der Meeresspiegel steigt. Grundsätzlich unterscheiden wir zwischen dem normalen Kalben einzelner Eisberge und sogenannten Aufbruchereignissen, bei denen innerhalb weniger Tage eine riesige Fläche zerbricht. Ersteres geht so langsam vonstatten, dass sich die Spannungen im Eis im Laufe der Zeit anpassen und nur der einzelne Eisberg kalbt. Bei Aufbruchereignissen dagegen hat man den Eindruck, als habe jemand die Eisplatte gesprengt. Dieses Phänomen konnten wir u. a. am Larsen-B- und am Wilkins-Schelfeis beobachten. Um Ereignisse dieses Ausmaßes vorhersagen und auch modellieren zu können, beobachten wir die Schelfeise und Gletscher so genau wie möglich.

Sie haben in einer Studie das Schicksal Tausender kleinerer und größerer Eisberge in der Antarktis untersucht, um herauszufinden, in welche Regionen die Eisberge treiben und wo genau sie ihr Schmelzwasser in das Meer eintragen. Was passiert Ihrer Meinung nach nun mit dem Larsen C-Koloss A68?

Thomas Rackow: *Das Schicksal der Eisberge wird in erster Linie von ihrer Größe bestimmt. Eisberge, die nicht länger und breiter als zwei Kilometer sind, treiben typischerweise inner-*

halb weniger Monate von der Schelfeiskante weg und aus dem Küstenbereich heraus. Der Wind drückt die Leichtgewichte auf das offene Meer hinaus, wo sie dann im Laufe von zwei bis drei Jahren in kleinere Stücke zerbrechen und schmelzen. Bei Riesen wie A68 spielt die Kraft des Windes dagegen nur eine Nebenrolle. Ihre Bewegung wird vor allem durch ihr Eigengewicht angetrieben. Das funktioniert, weil zum Beispiel die Oberfläche des Weddellmeeres keine ebene Fläche ist, sondern unter anderem durch die vorherrschenden Winde zur Küste hin um bis zu 50 Zentimeter ansteigt. Frisch gekalbte Eisberge dieser Größe rutschen also zunächst die schräge Meeresoberfläche hinunter. Ihre Rutschbahn verläuft dabei jedoch nicht als gerade Linie, sondern schlägt einen Bogen nach links. Der Grund dafür ist die Corioliskraft, welche auf die Erdrotation zurückzuführen ist und die Eisberge letztlich auf eine Bahn parallel zur Küste ablenkt. Die Riesen verbleiben also lange Zeit im kalten Küstenstrom und gelangen erst später in wärmere Gewässer, wo sie dann schmelzen.

Was heißt das jetzt für A68 ganz konkret? Wohin wird ihn seine Wanderung führen?

Thomas Rackow: *Sofern der Eisberg nicht zerbricht, stehen die Chancen gut, dass er zunächst für etwa ein Jahr entlang der Küste der Antarktischen Halbinsel durch das Weddellmeer wandern wird. Dann dürfte er einen Bogen schlagen und Kurs Richtung Nordosten nehmen. Das heißt, er wird vermutlich Südgeorgien oder die Süd-Sandwichinseln ansteuern und auf dem Weg im großen Ausmaß zu schmelzen beginnen. Wie schnell er auf dieser Wanderung vorankommen wird, hängt auch von der Topografie des Meeresbodens ab. Eisberge dieser Größe laufen regelmäßig auf Grund und bleiben daher eine Zeit lang stecken. Zudem frieren sie im Winter häufig im Meereis ein, sodass Wellen nicht mehr an ihre Ränder schlagen können und die Erosion an den Seiten des Eisbergs gedämpft wird.*

Lässt sich abschätzen, wie lange es A68 geben wird?

Thomas Rackow: *Mit Blick auf seine Gesamtmasse von mehr als eine Billion Tonnen Eis dürfte A68 bis zu acht oder zehn Jahre lang durch das Südpolarmeer wandern. Aber auch diese Aussage hängt davon ab, ob er in kleine Stücke zerbricht oder als Ganzes erhalten bleibt. B15 zum Beispiel zerbrach im November 2002 in mehrere Teile, von denen einige bis heute durch das Südpolarmeer treiben. Das Bruchstück B15AA, also das 27. Bruchstück des ursprünglichen Riesen, trieb im März 2017 an der Hausbucht der deutschen Antarktis-Forschungsstation Neumayer III vorbei. Aufgrund der vielen Bruchstücke gehen der Wissenschaft übrigens schon die Buchstaben aus, daher das zweite „A" im Namen von B15AA. Seine Wanderung im Küstenstrom dauert mittlerweile schon 17 Jahre an und hat den Eisberg vom Rossmeer 9 000 Kilometer weit auf die andere Seite der Antarktis geführt. B15AA war im März 2017 noch immer 20 Kilometer lang und wies eine Fläche von 200 Quadratkilometern auf, weshalb er weiterhin als „großer Tafeleisberg" geführt wird.*

Könnte es A68 auch einmal um den Kontinent schaffen?

Thomas Rackow: *Das ist tatsächlich nicht ganz ausgeschlossen. AWI-Forscher haben in der Vergangenheit einen GPS-Sender auf einem Eisberg installiert, welcher es – so unglaublich das auch klingen mag – tatsächlich geschafft hat, die Antarktis genau einmal im Uhrzeigersinn zu umqueren – und dies nicht im Küstenstrom, sondern vom Weddellmeer startend auf einer Route zwischen dem 50. und 60. Breitengrad Süd! Auch unsere Modellsimulationen zeigen Driftrouten, die von der Spitze der Antarktischen Halbinsel weit nach Osten reichen können, sofern Eisberge als Ganzes erhalten bleiben und nicht in kleinere Stücke zerfallen. Das ist aber nicht die Regel. Andere Eisberge, die in der Vergangenheit Rekordstrecken zurückgelegt haben und bis zur Südspitze Südamerikas getrieben sind, kamen wohl meist aus dem Ross- oder dem Amundsenmeer. Es gab auch schon Eisbergsichtungen vor der Küste Neuseelands. Diese Eisberge stammten dann aber vermutlich aus der Ostantarktis.* //

6 912

ANTARKTISCHE EISBERGE

bildeten die Datenbasis für Thomas Rackows Wanderrouten-Analyse. Er speiste ihre realen Positions- und Größendaten in das AWI Meereis-Ozean-Modell FESOM ein und koppelte es mit dem dynamisch-thermodynamischen Eisberg-Modell des AWI. Im Anschluss simulierte der Forscher das Treiben und das Schmelzen der Eisberge über einen Zeitraum von zwölf Jahren.

KOMPAKT

- **Das Kalben von Eisbergen ist ein natürlicher Prozess, der unter Umständen jedoch dazu führen kann, dass die in das Schelfeis mündenden Gletscher ihr Fließtempo beschleunigen und mehr Landeis in das Meer transportieren.**
- **Eisberge mit einer Größe von mehr als zwei Kilometern Länge treiben eher in Küstennähe, während kleinere Eisberge vom Wind auf das offene Meer hinausgeschoben werden.**
- **Unter Umständen schaffen es Eisberge, einmal um die gesamte Antarktis zu treiben.**



PER ANHALTER IN DIE ARKTIS

Aerosole sind winzige Partikel, die frei in der Atmosphäre schweben. Sie entstehen bei ganz unterschiedlichen Prozessen, zum Beispiel bei Waldbränden oder beim Verfeuern von Kohle und Erdöl. Heute weiß man, dass Aerosole das Klima entscheidend beeinflussen. Doch um die Wirkung der Teilchen noch besser einschätzen zu können, müssen die Messmethoden verbessert werden. AWI-Atmosphärenphysiker Christoph Ritter arbeitet daran, Aerosole per Laser vom Boden aus sicher zu bestimmen.



Für die Aerosol-Messungen schießt das LIDAR-System an der deutsch-französischen Forschungsstation AWIPEV auf Spitzbergen 50 Mal pro Sekunde einen Laserblitz in den Polarnachthimmel. Diese schnellen Lichtimpulse kann weder das menschliche Auge noch eine Fotokamera wahrnehmen. Deshalb erscheinen sie als konstanter grüner Lichtstrahl.

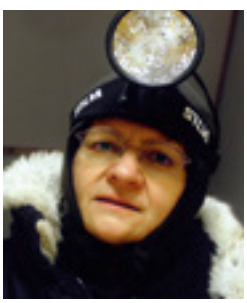
Text: **TIM SCHRÖDER**

Die Sahara und die Wüste Gobi sind nicht nur die größten Wüsten der Erde. Sie sind zugleich die größten Staubproduzenten. Wenn Winde über die sandigen Flächen wehen, reißen sie große Mengen feiner Partikel mit sich bis hoch in die Atmosphäre. Von der Sahara wandern die Teilchen sogar über den Atlantik bis nach Südamerika. Experten nennen solche Partikel „Aerosole".
Aerosole sind wenige Nanometer bis mehrere Mikrometer klein und damit so winzig, dass sie – einmal aufgewirbelt – kaum mehr zu Boden sinken. Sie entstehen in großen Mengen auch bei Waldbränden oder bei Ascheausbrüchen von Vulkanen. Außerdem setzt der Mensch heute viele Aerosole durch das Verbrennen von Öl oder Kohle frei. Auch Blütenpollen und sogar Bakterien und Viren können als Aerosole in der Luft schweben.

LICHTSPIELE AN AEROSOLEN

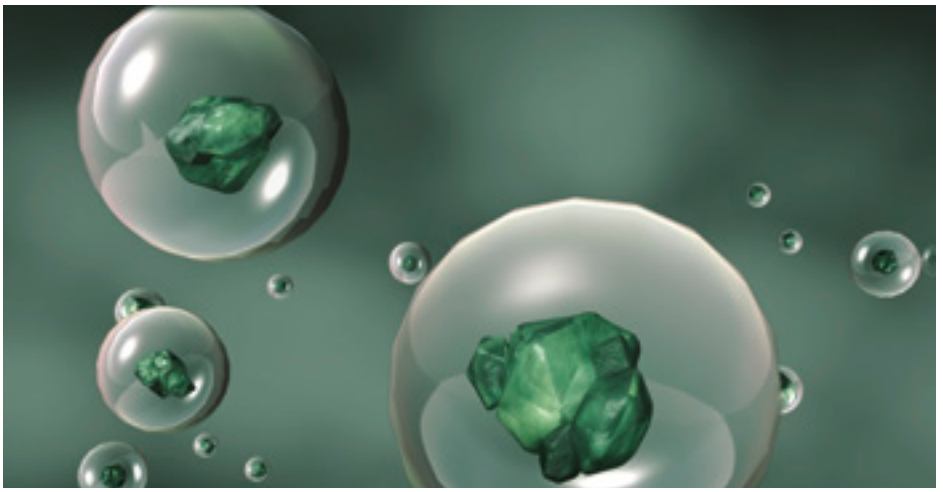
In der Klimaforschung spielen Aerosole eine große Rolle. Denn die Teilchen bestimmen mit, wie viel Sonnenenergie auf die Erde trifft und beeinflussen so zu einem Teil die Wärmebilanz des Planeten. Manche Aerosole reflektieren das Sonnenlicht der Erde zurück ins All und haben damit einen abkühlenden Effekt. Diese Eigenschaft zeigen vor allem kleine Tröpfchen, welche die Schwefelverbindung Sulfat enthalten. Andere Aerosole wie etwa Ruß wirken wärmend, weil sie das Sonnenlicht absorbieren und damit dessen Energie in der Atmosphäre halten. In geringerem Maße streuen und absorbieren Aerosole auch das von der Erde ins All zurückgestrahlte infrarote Licht.
Wie die Aerosole auf das Klima wirken, hängt unter anderem von ihrer Form, der Beschaffenheit ihrer Oberfläche sowie →

„An meiner Arbeit begeistert mich die Vielfalt der Aufgaben und die Herausforderungen, z. B. während unserer Expeditionen in die Arktis nach Spitzbergen. Darüber hinaus gefällt mir die Möglichkeit, vor allem auch mit jungen Kollegen im Team zusammenzuarbeiten. Die Studenten und Doktoranden können viel von meiner Erfahrung lernen, aber ich auch von ihnen: Sie haben oft eine erfrischende, andere Sichtweise auf die Dinge."



SIEGRID DEBATIN
Technikerin in der Atmosphärenforschung

DARUM LIEBE ICH MEINEN JOB



Aerosole, wie die hier dargestellten Meersalzpartikel, treiben die Wolkenbildung voran. An ihnen kondensiert Wasserdampf, sodass sich kleine Tropfen bilden und am Ende Wolken entstehen.

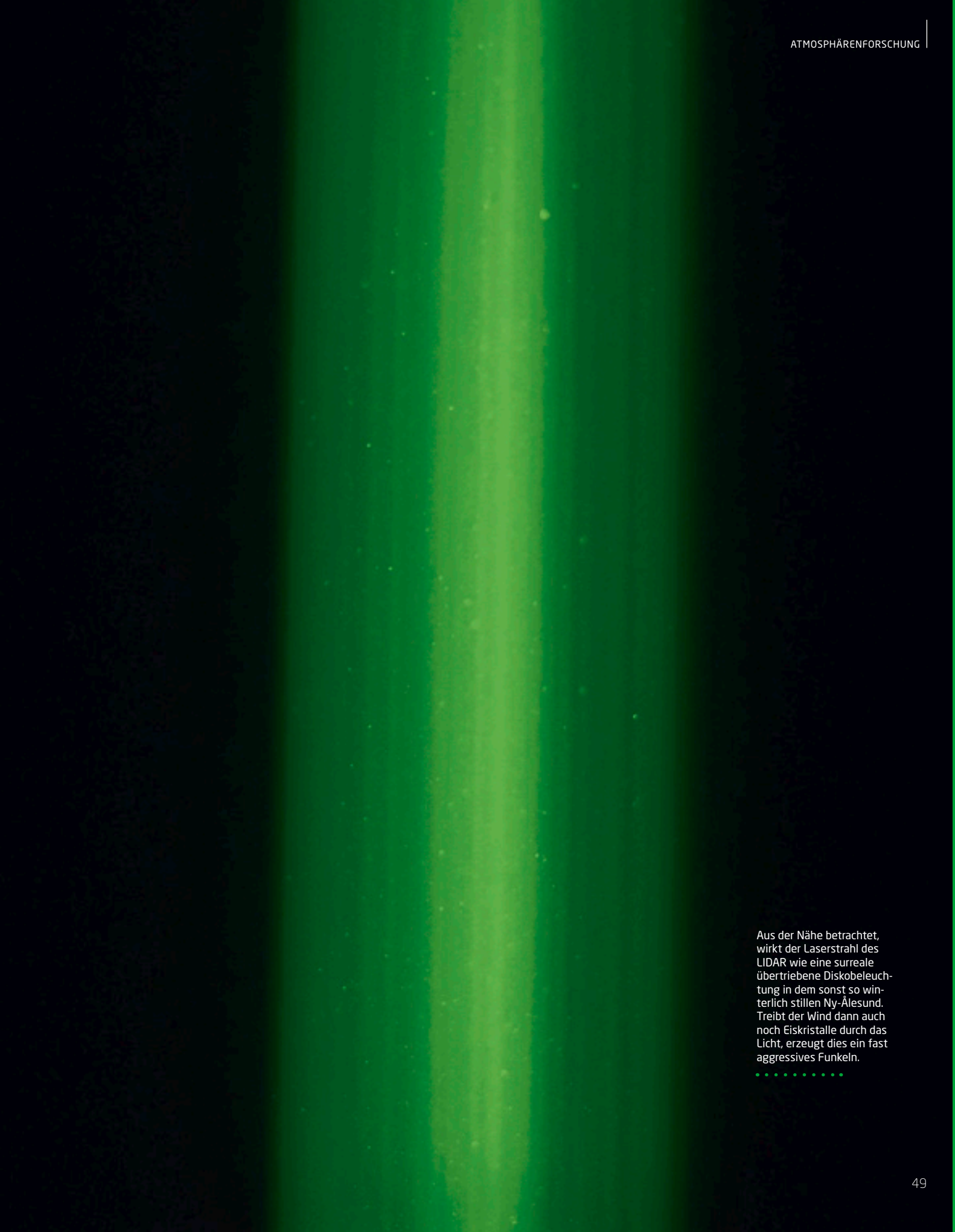
ihrer chemischen Zusammensetzung ab. Eine entscheidende Rolle spielen Aerosole auch bei der Entstehung von Wolken, weil sie als Kondensationskeime dienen, an denen sich Tröpfchen oder Eiskristalle bilden. Je nach Aerosoltyp kann die Kristallisationswirkung stärker oder schwächer sein. Viele biologische Partikel, zum Beispiel Pollen oder Krümel von Pflanzen, haben die Eigenschaft, in der Atmosphäre schon bei einer niedrigen Übersättigung der Luft mit Wasserdampf und Temperaturen um minus 10 Grad Celsius Eiswolken zu bilden. Bedenkt man, dass in bestimmten Schichten der Atmosphäre bis zu minus 50 Grad herrschen, findet die Eiswolkenbildung durch die Aerosole also bei vergleichsweise geringer Kälte statt. Diese Eiswolken sind eine wichtige Klimakomponente, weil sie das Klima anders als Wasserwolken beeinflussen.

ALLE 20 MILLISEKUNDEN EIN SCHUSS AUS DEM LASER

Der AWI-Atmosphärenphysiker Dr. Christoph Ritter kennt die Eigenschaften der Aerosole sehr genau, obwohl er ihnen in seiner täglichen Arbeit nur selten wirklich nahekommt. Christoph Ritter arbeitet mit einem LIDAR-System an der AWIPEV-Forschungsstation in Ny-Ålesund auf der arktischen Insel Spitzbergen. Dieses Gerät setzt sich aus einem Laser, einem Teleskop sowie einer Zählelektronik zusammen und jagt alle 20 Millisekunden einen Laserblitz senkrecht in den Himmel. Mehrere tausend Meter hoch.

Genau wie das Sonnenlicht wird das Laserlicht an den Aerosolen mehr oder weniger stark reflektiert, gestreut oder von diesen absorbiert. Je nachdem, wie stark diese Effekte sind, reflektieren die Aerosole den Laserblitz unterschiedlich stark zurück zur Erdoberfläche. Dieses reflektierte Licht wiederum wird von Empfängern im LIDAR wahrgenommen. „Daraus können wir eine ganze Menge ablesen und über die Aerosole erfahren", sagt Christoph Ritter.

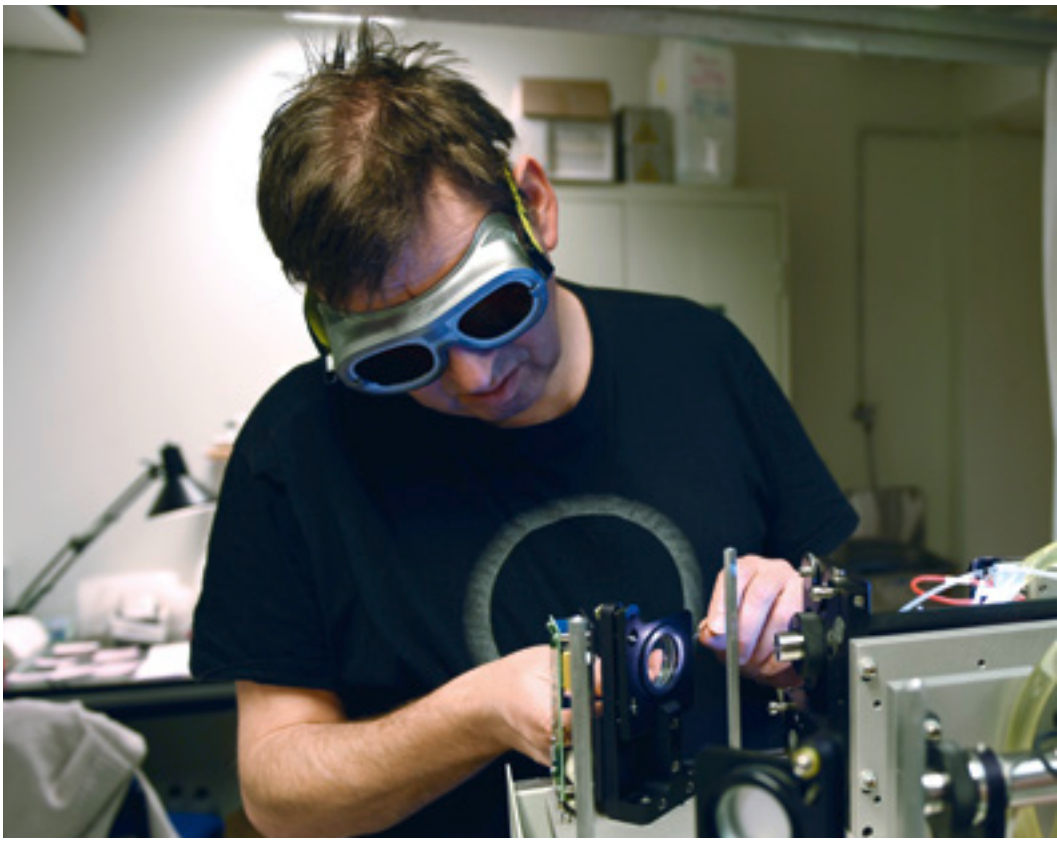
Die Laufzeit des Laserlichts etwa verrät ähnlich wie das Echolot eines Schiffs, in welcher Höhe sich die Aerosole befinden. Und aus der Schwächung des reflektierten Laserlichts und aus anderen Lichteigenschaften lässt sich ablesen, wie stark der Laserpuls gestreut oder absorbiert wurde. In der Regel gibt es in bodennahen Luftschichten besonders viele Aerosole. Aber auch in bestimmten Schichten zwischen zwei und vier Kilometer Höhe kommen Aerosole vor, die meist über weite Strecken transportiert werden. Diese Schichten sind mehrere hundert Meter dick. Vulkanische Aerosole steigen gar bis zu 14 000 Meter in die Stratosphäre auf. „Wir können nicht nur die Höhen, sondern auch bestimmte Aerosol-Klassen bestimmen", sagt Christoph Ritter. „Staubpartikel zum Beispiel unterscheiden sich charakteristisch von Aerosolen, die Kristalle aus Meersalz enthalten." →



Aus der Nähe betrachtet, wirkt der Laserstrahl des LIDAR wie eine surreale übertriebene Diskobeleuchtung in dem sonst so winterlich stillen Ny-Ålesund. Treibt der Wind dann auch noch Eiskristalle durch das Licht, erzeugt dies ein fast aggressives Funkeln.

20
MIKROMETER

groß sind die größten Sandkörnchen, die mit dem Wind gerade noch als Aerosol in die Atmosphäre getragen werden. Dieser Durchmesser entspricht in etwa der Größe eines Pollenkorns, welches aber deutlich leichter ist. Sandkörnchen dieser Größe sind so schwer, dass sie selten weiter als 100 Kilometer wandern und kaum höher als 1 000 Meter in die Atmosphäre aufsteigen.



AEROSOLE WANDERN RUND UM DIE WELT

In den vergangenen Jahren hat Christoph Ritter mit seinem LIDAR in Ny-Ålesund einige interessante Phänomene beobachten können. „Im Jahr 2006 haben wir kurzzeitig extrem hohe Konzentrationen von Partikeln festgestellt, die wir mit unserem System als Rückstände aus der Verbrennung von Biomasse identifizierten", erzählt er. So hohe Konzentrationen hatte er nie zuvor gemessen. Es stellte sich heraus, dass drei Tage zuvor, mit dem Beginn einer Schönwetterphase in Osteuropa, Tausende Bauern ihre Stoppelfelder abgebrannt hatten. Damit waren große Mengen von Kohlenstoffpartikeln in die Atmosphäre gelangt und dann in Richtung Arktis gezogen.

Auch Langstreckenrekorde hat Christoph Ritter hin und wieder zu bieten. „Im Juli 2015 konnten wir die Reiseroute von Partikeln aus Waldbränden in Kanada mitverfolgen – in zwei Wochen reisten die Partikel über Alaska und den Nordpol bis zu unserer Station auf Spitzbergen", erzählt er. Auch Weltumrundungen wurden schon nachgewiesen. Allerdings sind diese schwer zu erfassen, weil die Forscher die Luftmassen bei ihrer Reise um die Welt an verschiedenen Orten beproben müssen.

KOOPERATION MIT CHEMIKERN

Christoph Ritters Ziel ist es, die Verteilung verschiedener Aerosol-Typen in der Atmosphäre so genau wie möglich zu messen, um deren Einfluss auf das Klima künftig noch besser in mathematischen Klimamodellen simulieren zu können. Doch das ist trotz der ausgetüftelten Lasertechnik eine Herausforderung, weil es ungeheuer viele verschiedene Aerosole gibt. So können die Wissenschaftler bei Kohlenstoffpartikeln zum Beispiel nicht immer einfach erkennen, ob diese aus Waldbränden oder Verbrennungsrückständen von Öl oder Kohle stammen.

Zudem verändern sich die Aerosole während ihrer Reise durch die Atmosphäre chemisch. Viele reagieren mit dem Wasserdampf und werden von Wasser umhüllt, wodurch sich die optischen Eigenschaften ändern. Andere reagieren miteinander, sodass sich Klümpchen bilden können, die zum Beispiel Meersalz und Kohlenstoffpartikel aus Waldbränden enthalten. „Chemiker in Italien, mit denen wir eng zusammenarbeiten, haben die Partikel mithilfe von Sonden in der Atmosphäre gesammelt und unter dem Mikroskop untersucht. Sie haben unzählige verschiedene Formen und chemische Zusammensetzungen entdeckt", sagt Christoph Ritter.

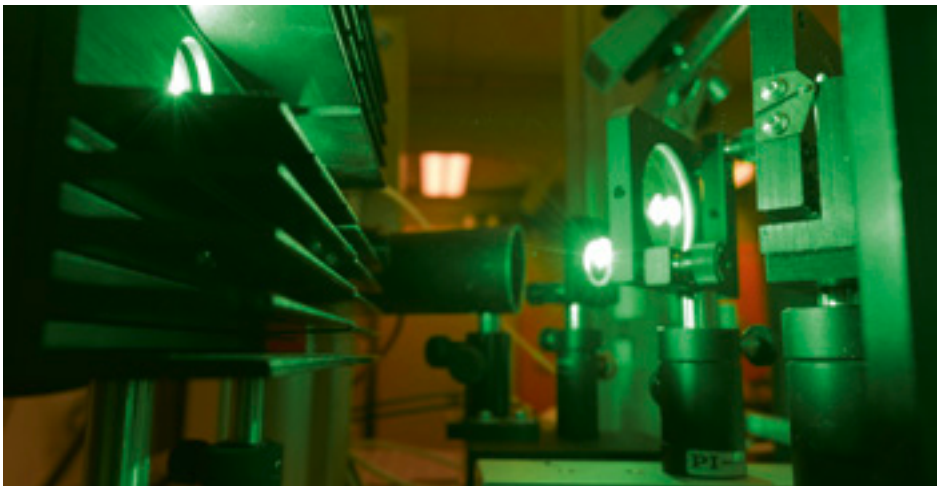
Schon die Kohlenstoffpartikel aus einem Waldbrand können sich fundamental unterscheiden. Manche sind länglich, andere kettenförmig. „Meine italienischen Kollegen haben sogar Partikel gefunden, die innen hohl sind – und diese Popcorn-Aerosole getauft", erzählt er.

FORSCHUNG AN DEN GRENZEN DER OPTIK

Um Aerosole künftig besser voneinander zu unterscheiden, hat Christoph Ritter in den vergangenen Jahren mit den Chemikern gemeinsame Messkampagnen durchgeführt. Während der Laser die optischen Eigenschaften der Aerosole vom Boden aus vermaß, schickten die Chemiker in Ny-Ålesund Sonden nach oben, um Proben zu nehmen. Anschließend verglichen die Forscher die Ergebnisse. „Dieser Vergleich hat uns viele neue Erkenntnisse darüber beschert, wie be-



Ingenieur Wilfried Ruhe von der Firma Impres wartet regelmäßig das LIDAR-System und eicht dessen Einstellungen. Da der Laser den Augen schaden kann, trägt der Experte bei der Arbeit eine Schutzbrille.



Blick auf den optischen Aufbau des LIDAR. Seine Lichtimpulse werden über verschiedene Spiegel aus dem Geräteraum geleitet und durch eine Luke im Hallendach Richtung Himmel geschickt.

stimmte Partikel im Lasersignal repräsentiert werden", sagt Christoph Ritter. „Wir haben aber auch gemerkt, dass wir noch viele solche Experimente benötigen, um Partikel per Laser künftig wirklich sicher unterscheiden zu können."

Das Problem: Über die optischen Eigenschaften kann man nur indirekt auf die Gestalt der Moleküle schließen. Und dabei steht Christoph Ritter vor einer grundlegenden physikalischen Herausforderung. „In der Physik kann man zwar von den Streueigenschaften auf die Gestalt eines Gegenstands schließen, allerdings basiert die Berechnung der Streuung in der Physik auf dem Ideal einer kugelförmigen und glatten Oberfläche. Wir haben es aber mit ganz anderen Geometrien zu tun", erläutert er.

Damit wird es schwierig, aus dem Streusignal die sogenannte Mikrophysik der Aerosole zu bestimmen – ihre Form, ihre Größe oder das Lichtbrechungsverhalten. „Noch haben wir einige Jahre Forschung vor uns, denn die Bestimmung der Aerosole per Laser hat sich als deutlich komplizierter erwiesen, als wir noch vor wenigen Jahren gedacht hätten", sagt Christoph Ritter. „Aber ich denke, dass wir es schaffen werden, insgesamt verlässlichere Aussagen über die Eigenschaften der Aerosole abzuleiten."

In jedem Falle sei es wichtig, die Aerosolinformationen künftig verstärkt in die Klimamodelle einzubauen, sagt Christoph Ritter. Wenn Aerosole zur Erwärmung oder Abkühlung von Luftmassen beitragen, beeinflussen sie nämlich auch die Bildung von Hoch- und Tiefdruckgebieten und somit von Luftströmungen. Damit wirken sie fundamental im Klimageschehen mit. Und dass obwohl sie so winzig und leicht sind, dass der Wind sie in alle Richtungen verstreut. //

KOMPAKT

- **Aerosole absorbieren, reflektieren oder streuen das Sonnenlicht und haben damit einen entscheidenden Einfluss auf das Klima. Dabei hängt die Wirkung der Aerosole von ihrer Gestalt oder chemischen Zusammensetzung ab.**
- **Aerosole können mit einem Laser vom Boden aus auch in hohen Luftschichten detektiert werden. Dieses Verfahren hat aber seine Grenzen, weil sich heute noch nicht jedes Aerosol anhand seiner optischen Eigenschaften bestimmen lässt.**
- **Durch gemeinsame Messungen mit Chemikern wollen die AWI-Atmosphärenforscher herausfinden, welchen optischen Fingerabdruck bestimmte Aerosole haben, um sie besser aus der Ferne bestimmen zu können.**

Die Stärken des Rechnens

AWI-Klimaforscher erklären, warum sie mit Klimamodellen arbeiten



PROF. DR. GERRIT LOHMANN

Leiter der AWI-Sektion „Dynamik des Paläoklimas"

Ich arbeite mit Erdsystemmodellen. Dabei kommt es mir darauf an, dass wir die Bandbreite der Lösungen und Unsicherheiten im Klimasystem und damit seine Variabilität über Zeiträume von Abermillionen Jahren verstehen. Letztere beinhaltet den Wechsel zwischen Eis- und Warmzeiten, die Klimasensitivität gegenüber externen Störungen und die Klimatrends der zurückliegenden Jahrtausende.

+

Ohne Modelle können wir die Zusammenhänge im System nicht verstehen und auch keine Phänomene erklären.

Außerdem entwickeln wir Prognosen für bislang unbeobachtete Größen oder machen Abschätzungen für künftige Klimazustände. Wir versuchen, die Erdsystemmodelle auf allen Zeitskalen einzusetzen – von der Vergangenheit bis hin zur Zukunft. Je nach Fragestellung berücksichtigen wir neue Klimakomponenten. Neuerdings setzen wir zum Beispiel Eisschildmodelle ein, die etwas über den Meeresspiegel aussagen. Faszinierend finde ich, die Rückkopplungen im Erdsystem zu verstehen. Aus Modellen entwickeln wir neue Ideen und Hypothesen, die wir dann testen. Dazu muss man nicht nur das Modell verstehen, sondern sich auch geeignete Randbedingungen und Simulationen überlegen.



DR. DÖRTHE HANDORF

Wissenschaftlerin in der Sektion „Physik der Atmosphäre"

Ein Schwerpunkt meiner Forschung ist die Frage, wie die dramatischen Klimaänderungen in der Arktis mit dem Wetter und Klima in Mitteleuropa verbunden sind. Das Schwierige an diesen Wechselwirkungen ist, dass neben den arktischen Faktoren zum Beispiel auch Änderungen in den Tropen und die interne Variabilität des Klimasystems einen Einfluss ausüben. Wenn wir dessen Ausmaß abschätzen wollen, reicht es nicht, unsere Beobachtungsdaten zu analysieren oder es mit hochkomplexen Klimamodellen zu berechnen.

+

Wir brauchen außerdem vereinfachte Klimamodelle, welche uns erlauben, einige der zusätzlichen Einflussfaktoren zu separieren.

Wir arbeiten dabei mit einem vereinfachten atmosphärischen Modell der Nordhemisphäre, welches trotz seiner Einfachheit die Variabilität der großräumigen atmosphärischen Strömung sehr gut simuliert. In den neuesten Modellexperimenten konnten wir zeigen, dass das Modell auf die Erwärmung der Arktis mit Änderungen dieser Strömung reagiert. Sie sind wiederum tatsächlich mit einem häufigeren Auftreten kälterer Winter über Mitteleuropa verbunden. Die Dynamik der Atmosphäre spielt demzufolge eine wichtige Rolle für die Wechselwirkungen zwischen der Arktis und den mittleren Breiten.



DR. CLAUDIA WEKERLE

Wissenschaftlerin in der Sektion „Physikalische Ozeanographie"

Ich arbeite mit FESOM, dem Finite-Element-Sea ice-Ocean-Model, das auf sehr verschiedenen Zeitskalen eingesetzt wird, von Paleoklimasimulationen bis zu Zukunftsprojektionen. Dieses Modell wurde und wird in der Sektion Klimadynamik am AWI entwickelt. Anders als traditionelle Ozeanmodelle, welche auf strukturierten Gittern basieren, simuliert FESOM die Ozeanströmungen, Hydrografie und das Meereis auf unstrukturierten Gittern basierend auf Dreiecken. Ich benutze FESOM, um die Zirkulation in der Framstraße zu simulieren. Diese liegt zwischen Grönland und Spitzbergen und ist eine der wichtigsten Verbindungen zwischen dem Arktischen Ozean und dem Nordatlantik. In den letzten Jahren gab es dort einen starken Rückgang des arktischen Meereises. Außerdem wurde mehr warmes und salziges Atlantikwasser in die Arktis transportiert. Modellierung hilft uns, die dafür verantwortlichen Prozesse und den Austausch von Wassermassen durch diese wichtige Wasserstraße besser zu verstehen.

+

Gelingt es uns, die vergangenen und gegenwärtigen Prozesse in der Framstraße realistisch zu simulieren, können wir auch Zukunftsprojektionen berechnen.

Mich fasziniert FESOM, weil es durch die unstrukturierte Gitterfunktionalität sehr flexibel eingesetzt werden kann. Besonders wichtige Gebiete wie zum Beispiel enge Meeresstraßen können wir so hoch auflösen und obendrein Computerressourcen effektiv nutzen.



DR. ANNETTE RINKE

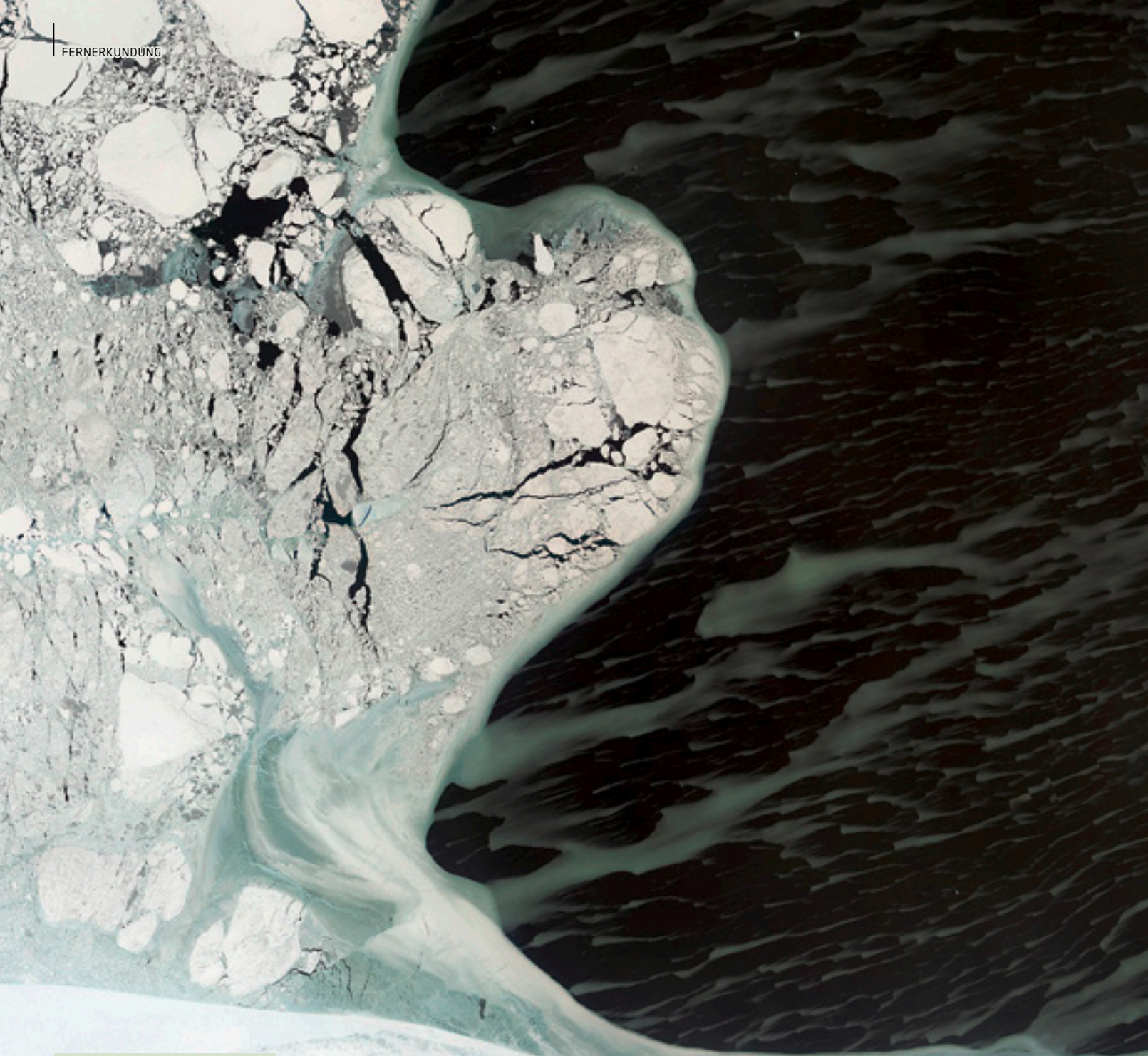
Wissenschaftlerin in der Sektion „Physik der Atmosphäre"

Ich arbeite mit einem regionalen Klimamodell für die Arktis. Dieses Modell umfasst mehrere Komponenten: die Atmosphäre, das Meereis, den Ozean und das Land. Simulationen mit diesem Modell helfen, das arktische Klima, seine Variabilität und Trends (z. B. die arktische Verstärkung) in den zurückliegenden 40 Jahren zu interpretieren und mehr über die verschiedenen Rückkopplungsprozesse zu lernen.

+

Mich interessiert zum Beispiel gerade ein möglicher wechselseitiger Zusammenhang zwischen extremen Stürmen und Meereisänderungen.

Ich nutze das Modell auch, um zukünftige Klimaszenarien für die Arktis zu rechnen. Daran sind aufgrund der ausgeprägten Erwärmung und der zunehmenden arktischen Industrialisierung Entscheidungsträger aus Politik, Wirtschaft und Gesellschaft interessiert. Mich begeistern die unendlichen „Spielmöglichkeiten" mit dem Modell. Sie erlauben es uns, die komplexen Klimaprozesse immer ein klein bisschen besser zu verstehen.



Als dunkle Fläche zeigt diese RapidEye-Satellitenaufnahme die etwa 70 Kilometer breite MacKenzie-Bucht-Polynia am Amery-Schelfeis in der Ostantarktis. Die grauen Schlieren sind Eisschlamm, den der Wind an den Rand der aufgebrochenen Meereisdecke drückt. Dort gefriert er dann zu einer kompakten Eisdecke

DIE LÜCKEN IM BLICK

Küstenpolynien sind offene Wasserflächen im eisbedeckten Ozean, die sich bilden, wenn ablandige Fallwinde das Meereis von der Küste wegschieben. Sie gelten sowohl in der Arktis als auch in der Antarktis als Meereisfabriken und spielen eine wichtige Rolle im Klimasystem der Polarregionen. Bisher aber weiß man nur wenig über diese Lücken im Eis. AWI-Wissenschaftler haben sie deshalb mithilfe mehrerer Satelliten ins Visier genommen und es erstmals geschafft, die vielen verschiedenen Aufnahmen zu einem aussagekräftigen Gesamtbild zu verschmelzen.

Text: **TIM SCHRÖDER**

Auf der Erde gibt es Gegenden, die bis heute kaum ein Mensch betreten hat. Dazu gehören auch weite Teile der Antarktis. Das ist kaum verwunderlich, denn die Antarktis ist 37-mal so groß wie Deutschland, und obwohl es Flugzeuge und Motorschlitten gibt, sind Expeditionen durch die Schnee- und Eiswüste bei Temperaturen weit unter Null gefährlich und beschwerlich. Viele Gebiete der Antarktis wären noch immer Terra incognita, wenn es nicht seit einigen Jahrzehnten Satelliten gäbe, die die Antarktis regelmäßig in den Blick nehmen. Die Daten der Satelliten →

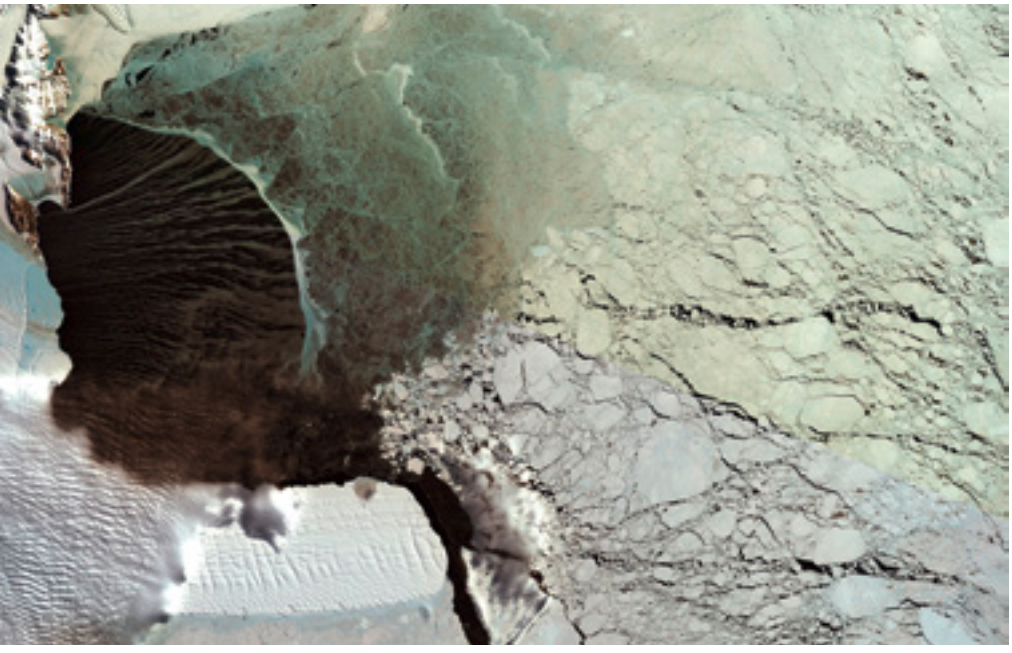
verraten viel über die Gestalt, Bewegung und Temperatur des Eises – wichtige Informationen, aus denen sich auch ablesen lässt, wie die antarktischen Eismassen auf den Klimawandel reagieren.

Zu den besonders interessanten Phänomenen in der Antarktis, die sich mit den Satelliten beobachten lassen, gehören die Polynien. Das sind freie Wasserflächen, die sich an der Küste auftun, wenn der stete Wind das Meereis vom Land oder von der Schelfeiskante forttreibt. Für Wissenschaftler sind die Polynien besonders interessant. Zum einen gelten sie als Eisfabriken der Polarregionen. Denn wenn der Wind das Eis fortreibt, wird das offene Wasser der kalten Luft ausgesetzt, sodass sich schnell neues Eis bildet. Zum anderen sind Polynien in biologischer Hinsicht interessant. Ohne die Schicht aus Eis gelangt mehr Licht ins Wasser, wodurch das Phytoplankton besser wachsen kann. Polynien können daher besonders produktive Meeresgebiete sein.

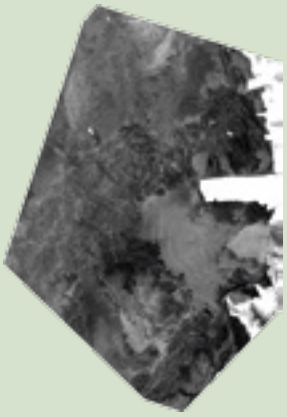
Da die antarktischen Polynien mehrere 1 000 Quadratkilometer groß sein können und von mächtigen Eismassen umschlossen sind, ist es unmöglich, sie umfassend vom Land oder vom Eisbrecher aus zu untersuchen. Die AWI-Wissenschaftler Dr. Wolfgang Dierking und Dr. Thomas Hollands setzen deshalb auf Satellitenmessungen, um sich aus der Ferne einen Überblick zu verschaffen: „Heute sind sehr viele Satelliten im All, die mit ganz unterschiedlichen Messgeräten die Erde beziehungsweise die Antarktis beobachten. Wir nutzen diese Daten, um die Polynien und die Vorgänge in diesen Meeresgebieten insgesamt besser zu verstehen“, sagt Wolfgang Dierking.

Aufwändige Datenrecherche

Thomas Hollands und Wolfgang Dierking gehören zu den ersten Forschern weltweit, die verschiedene Satellitendaten systematisch zusammengetragen haben, um sich ein genaues Bild von den Polynien zu machen. Der Grund: Das Zusammensammeln der Satellitendaten ist eine Heidenarbeit. „Es gibt ja kein weltweites Archiv, in dem die Daten aller Satelliten gespeichert sind“, sagt Thomas Hollands, der Monate mit der Datenakquise in den elektronischen Archiven der verschiedenen Raumfahrtagenturen verbracht hat. Hinzu kommt eine weitere Hürde. Nicht jeder Satellit nimmt kontinuierlich Messwerte auf, weil die Datenspeicher an Bord schnell überfüllt wären. Das liegt daran, dass die Datenübermittlung zur Erde nicht schnell genug ist. Damit gibt es nicht von jedem Punkt der Erde zu jedem beliebigen Zeitpunkt Messwerte. Thomas Hollands musste daher zunächst einmal herausfinden, für welche Zeiträume ausreichende Daten aus dem Polyniengebiet vorlagen.



Diese Landsat-Aufnahme der Terra Nova-Bucht im Rossmeer zeigt, warum die Küstenpolynien auch Meereisfabriken genannt werden. Auf der Wasserfläche bildet sich Eisschlamm, der gegen das Packeis gedrückt wird, sich dort verdichtet und zu einer geschlossenen Meereisdecke gefriert. Diese Decke wird immer dicker und selbst zum Packeis, das hinaustreibt. Gleichzeitig bildet sich in der Polynia weiter Eisschlamm, sodass die Eisproduktion weitergeht.

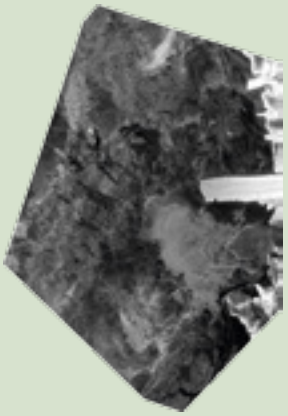


ASAR-AUFNAHME

ASAR war ein Radarsystem, das die Erde mit kurzen C-Band Mikrowellen abgetastet hat. Auf seinen Aufnahmen sind Schollen gut zu erkennen. Die Helligkeit der einzelnen Scholle hängt vom Alter und der Rauheit ihres Eises ab.

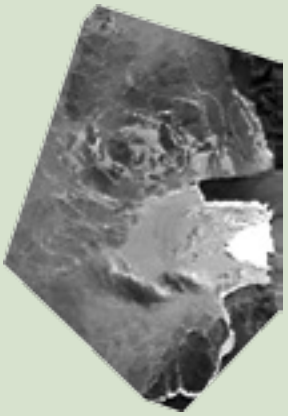
Starke Ergebnisse dank Datenfusion

Die beiden AWI-Wissenschaftler haben jetzt erstmals die Messwerte der verschiedenen Satelliten und Geräte systematisch miteinander verglichen und kombiniert und konnten dadurch Vorgänge analysieren, die mit einer einzelnen Messmethode nicht sichtbar gewesen wären. Ein Beispiel ist die Eisbewegung rund um zwei Polynien im antarktischen Rossmeer, etwa 4 000 Kilometer südlich der neuseeländischen Stadt Christchurch. Die Forscher stellten fest, dass sich zwischen den Polynien ein breites Feld bildet, in dem das Eis zusammengepresst wird. Auch konnten sie



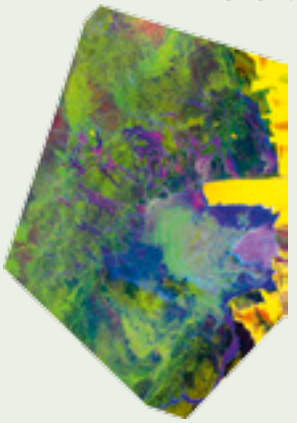
PALSAR-AUFNAHME

PALSAR war ein langwelliges L-Band-Radar, das tief ins Eis blickte. Seine Aufnahmen betonen Deformationszonen – also jene Gebiete, in denen das Meereis bricht oder sich zu Presseisrücken auftürmt.



AATSR-AUFNAHME

Der AATSR-Sensor war ein Radiometer, das den Forschern erlaubt, die Oberflächentemperaturen von Land und Ozean zu berechnen. Sie können so zwischen kaltem Eis und wärmerem Meerwasser unterscheiden.



ANALYSE-ERGEBNIS

Wenn alle Daten zusammengefügt werden, ergibt sich dieses Bild. Es zeigt u. a. das Schelfeis in Gelb, dickere und rauere Eisschollen in Grün sowie die Polynia und Risse im Meereis in Magenta-Blau-Violett.

ermitteln, mit welcher Geschwindigkeit das Eis in den verschiedenen regionalen Abschnitten des Rossmeeres fließt. Das bedeutet also, dass sich Polynien und Meereis heute auch in jenen Regionen sehr genau beschreiben lassen, die der Mensch nur selten oder nie besucht. Das ist nicht zuletzt für die Klimaforschung hochinteressant, weil Polynien Gebiete sind, in denen es zu einem regen Wärmeaustausch zwischen der Atmosphäre und dem warmen Meerwasser kommt.

Betrachtet man hingegen nur einzelne Satellitenmessungen, ist es sogar schon eine Herausforderung, in den Daten eisfreie und eisbedeckte Flächen voneinander zu unterscheiden. „Es ist ja so, dass die meisten Satellitensensoren keine Farbfotos liefern, sondern Messwerte, die zunächst interpretiert werden müssen", sagt Wolfgang Dierking. „Aus diesen muss man dann ein Bild der Meereisverhältnisse generieren." Radargeräte zum Beispiel messen die Rückstreuung von Mikrowellen, die ganz andere Informationen als das Licht liefern. Passive Radiometer wiederum nehmen die von der Erde zurückgestreute Wärmestrahlung wahr, aus der Temperaturwerte abgeleitet werden können.

Ein Gesamtbild erzeugen

Für die Polynien zeigt sich, dass die Kombination Gold wert ist. Radarmessgeräte etwa haben mitunter Probleme, zwischen Eis und Wasser zu unterscheiden. Auch kann Schmelzwasser auf dem Eis die Sensoren verwirren. Kombiniert man die Radardaten mit den Temperaturwerten der Radiometer, wird es klarer: Eis erscheint aus dem All in der Regel kälter als offenes Wasser. Dünnes Eis wiederum kann man von dickem Eis unterscheiden, weil es mehr von der Meereswärme hindurchlässt. Die Kombination verschiedener Methoden ist auch deshalb sinnvoll, weil jeder Satellitensensor eine andere Flächenauflösung hat. Je nach Sensortyp kann diese zwischen wenigen Metern und mehreren Zehner Kilometern liegen. In der Summe können Wolfgang Dierking und Thomas Hollands also sehr feine Strukturen vermessen, die ihre Kollegen auf dem Eisbrecher dann auch tatsächlich so vorfinden. „Uns freut besonders, dass inzwischen mit einer Schiffsexpedition bestätigt wurde, dass sich zwischen den Polynien im Rossmeer genau solches Presseis befindet, wie wir es anhand der Satellitendaten beschrieben haben", meint Thomas Hollands.

Er geht davon aus, dass die Fusion der verschiedenen Satellitendaten viele neue Erkenntnisse liefern wird. „Unser Ziel für die Zukunft ist die Entwicklung von Algorithmen, die aus den vielen Sensordaten automatisch auf die verschiedenen Eisformen und Eisklassen schließen – ohne die Daten mühsam interpretieren oder zusammensammeln zu müssen", sagt Wolfgang Dierking. //

KOMPAKT

- **Polynien entstehen meist, wenn ablandiger Wind von den Randgebieten der Eisschilde das Meereis von der Küste forttreibt. Sie kommen sowohl in der Arktis als auch in der Antarktis vor. Antarktische Polynien können mehrere 1 000 Quadratkilometer groß sein.**
- **Polynien sind sowohl für das Leben im Meer als auch das Klima in den Polargebieten von Bedeutung. Hier kommt es zu einem Energieaustausch zwischen dem relativ warmen Meerwasser und der kalten Polarluft.**
- **Die Entstehung oder Dynamik der Polynien lässt sich sehr gut mit Satellitensensoren erfassen. Allerdings müssen dazu Informationen verschiedener Sensoren kombiniert werden. Diese Datenfusion ist bislang besonders aufwändig.**

Die Ozon Story



AWI-Meteorologen messen einmal wöchentlich die vertikale Ozonverteilung über der Arktis und der Antarktis. Dazu lassen sie in beiden Polarregionen eine Ozonsonde an einem Wetterballon aufsteigen. Bei starkem Wind wird ein solcher Ballonstart zu einem echten Kraftakt.

Den Begriff Ozon verbinden viele Menschen mit dem Thema Ozonloch und der Angst vor zunehmender UV-Strahlung. So erging es am Anfang auch dem AWI-Atmosphärenphysiker Markus Rex. Nach mehr als 25 Jahren Forschung zur Chemie des Ozonabbaus weiß er aber heute, dass Ozon ein wichtiger Akteur im Klimageschehen ist, der nicht außer Acht gelassen werden darf. Eine Geschichte mit guten Nachrichten und der Erkenntnis, dass es ohne strategisches Forschen keinen Wissenszuwachs gibt.

Text: **TIM SCHRÖDER**



Prof. Dr. Markus Rex gehört zu den weltweit führenden Ozon-Experten. Er forscht seit mehr als 25 Jahren zu diesem Thema.

Das Titelbild des Magazins SPIEGEL vom 30. November 1987 schlug wie eine Bombe ein. Neben der Schlagzeile „Lebensgefahr aus der Dose – das Ozonloch" war ein blauer Himmel zu sehen, in dem ein schwarzes Loch klaffte. Kurze Zeit zuvor hatten US-Forscher bewiesen, dass chlorhaltige Treibgase aus Spraydosen die Ozonschicht zerstören – jene Schicht, welche die schädliche UV-Strahlung der Sonne abschirmt. In dem SPIEGEL-Artikel war von steigenden Hautkrebsraten und von Gendefekten bei Pflanzen und Tieren die Rede. Nicht nur in Deutschland, sondern rund um die Welt schreckten solche Nachrichten auf. Der Schock hatte sein Gutes. Mit dem Montreal-Protokoll, das am 1. Januar 1989 in Kraft trat, vereinbarte die Weltgemeinschaft einen Ausstieg aus der Produktion der gefährlichen Gase.

Große Wissenslücken

Doch die Angst blieb. Denn damals war noch weitgehend unklar, wie sich der Abbau der Ozonschicht in Zukunft fortsetzen würde. Noch wusste man zu wenig über die Chemie des Ozonabbaus. So begannen Forscher Anfang der 1990er-Jahre weltweit, sich intensiv mit der Atmosphärenchemie und dem Ozon zu befassen. Zu ihnen gehörte der AWI-Atmosphären-Physiker Prof. Markus Rex. „Damals konnte man nur relativ grob abschätzen, wie stark der Ozonabbau in verschiedenen Regionen der Erde war. Bekannt war vor allem, dass sich im Südwinter über der Antarktis ein Ozonloch ausbildete. Was z. B. über der uns viel näher liegenden Arktis geschehen würde war weitgehend unklar", sagt er mit Blick auf die Anfangszeit. Markus Rex ist einer der weltweit führenden Ozonforscher. Im Laufe der Zeit hat er mit seiner Arbeit wesentlich zum Wissensgewinn beigetragen.

Ging es am Anfang vor allem darum, den Ozonabbau genau zu beobachten und zu verstehen, so änderte sich der Fokus der Forschung nach und nach. „Mit dem wachsenden Wissen über das Ozon wurde immer deutlicher, dass die Ozonschicht nicht nur als UV-Filter wichtig ist, sondern auch einen großen Einfluss auf das Klimageschehen der Erde hat", sagt er. „Wenn man herausfinden will, wie sich das Klima der Erde verändert, muss man das Ozon als wichtige Größe mit einbeziehen."

Ein Messstandard für die Welt

Genau dieses Ziel verfolgt Markus Rex heute. Er verbindet sein Wissen über die Ozonchemie in der Atmosphäre mit etablierten Klimamodellen. Um zu erklären, wie das geht, schlägt →



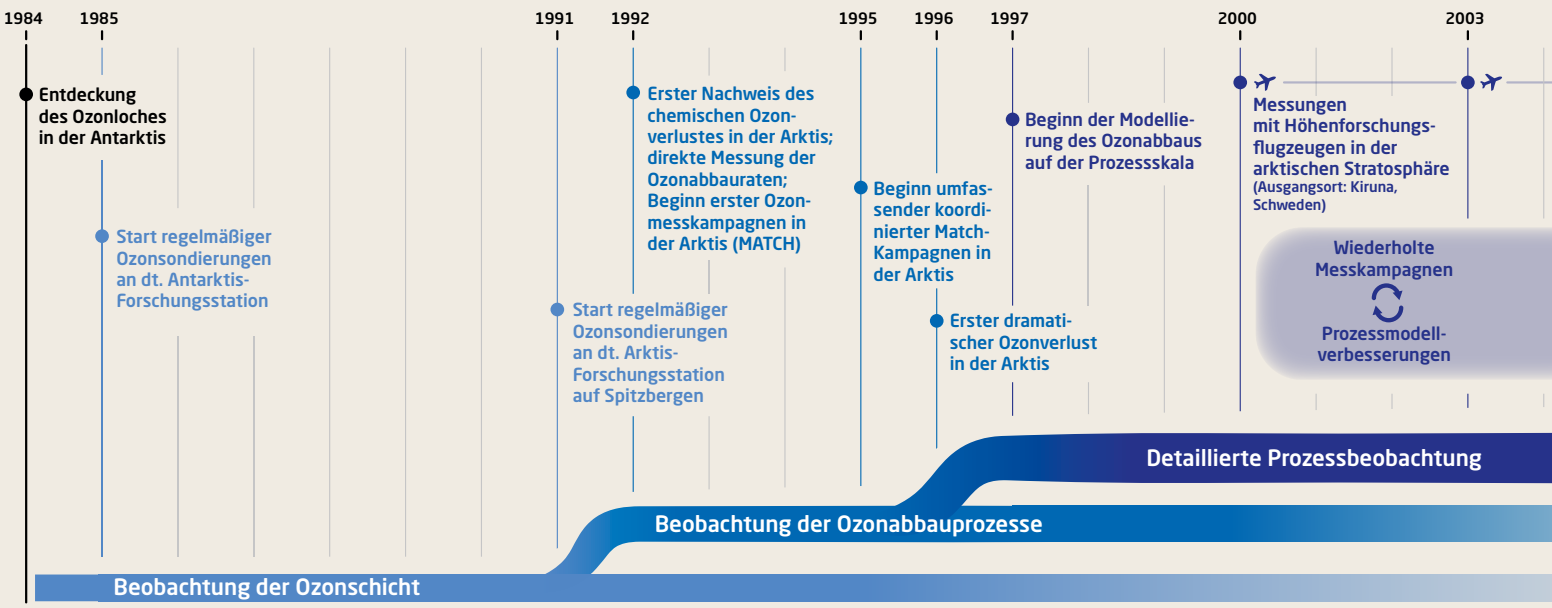
Seit dem Jahr 1991 messen AWI-Meteorologen regelmäßig die Ozonwerte über Spitzbergen. Dank ihrer Langzeitbeobachtungen wissen wir heute, dass es auch in der Arktis zu dramatischen Ozonverlusten kommen kann.

er den Bogen zurück zu den Anfängen seiner Forschung. „Anfang der 1990er-Jahre gab es noch nicht einmal eine zuverlässige Methode, um den anthropogenen, also den von Menschen verursachten, chemischen Ozonabbau in der Atmosphäre zu messen", sagt er. Das Problem: In den höheren Schichten der Atmosphäre, in denen sich die Ozonschicht befindet – etwa zwischen 15 und 25 Kilometer Höhe – sind die Luftmassen permanent in Bewegung. Damit kann die Ozonkonzentration von Tag zu Tag an ein und derselben Messstation stark schwanken – manchmal um mehr als 30 Prozent. „Der durch den Menschen verursachte Abbau spielt sich aber im Bereich von wenigen Prozent pro Tag ab, sodass die kurzfristigen natürlichen Schwankungen es unmöglich machen, den geringen täglichen Abbau direkt zu messen. Aber gerade dieser Abbau ist es, der das Schicksal der Ozonschicht langfristig bestimmt", so der Forscher.

Um dieses Problem zu umgehen, entwickelte Markus Rex eine Messmethode, bei der man eine Luftmasse verfolgt. Während sie weiterwandert, werden immer wieder Messballons nach oben geschickt, um sie zu analysieren. „Das erfordert natürlich eine konzertierte Aktion vieler Kollegen, die an vielen verschiedenen Orten in der Arktis die Messgeräte aufsteigen lassen", erläutert Markus Rex. Aber, so lasse sich genau erkennen, wie sich die Konzentration des Ozons in der Luftmasse verändert. Diese sogenannte Match-Methode wird heute weltweit als ein Standard für die Messung des chemischen Ozonabbaus eingesetzt.

WISSENSGEWINN DANK STRATEGISCHER FORSCHUNG

Die Meilensteine der Ozonforschung im Überblick



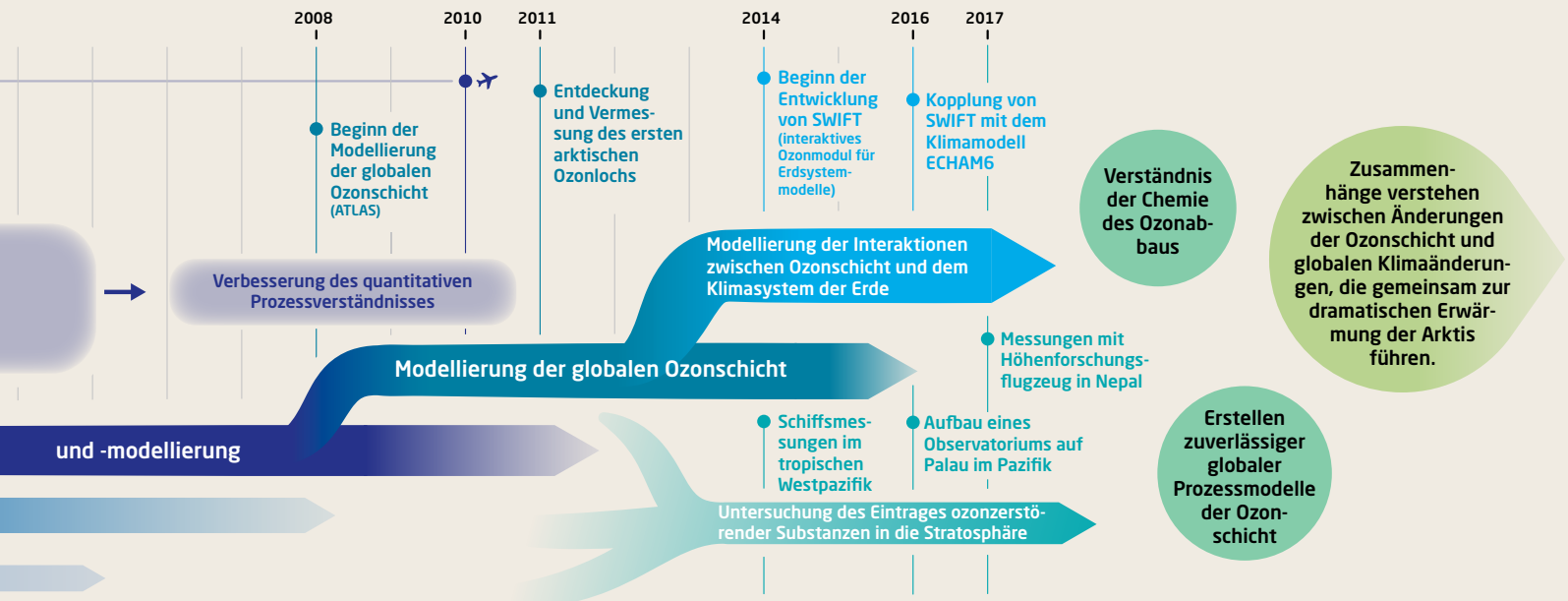


Die Langzeitmessungen an der deutschen Antarktis-Forschungsstation Neumayer III belegen, dass das regelmäßig wiederkehrende Ozonloch über der Antarktis nicht mehr wächst.

Komplexe Atmosphärenchemie

Der nächste Schritt war die Analyse der chemischen Vorgänge. In groben Zügen waren diese schon in den 1980er-Jahren klar: Ozon wird vor allem im Winter bei extrem tiefen Temperaturen in der Stratosphäre abgebaut. Dazu tragen unter anderem reaktive Chlor-Radikale bei, die damals insbesondere aus den sogenannten Treibgasen stammten. Nach und nach entschlüsselten Markus Rex und andere Forscher die komplexe chemische Wirkkette des Ozonabbaus und auch, wie die einzelnen Schritte von den Umweltbedingungen abhängen. Er entwickelte ein mathematisches Modell, mit dem er die chemischen Vorgänge in der Atmosphäre nachspielte. Anfangs lieferte dieses oft andere Ergebnisse als die realen Messungen. Um die volle Komplexität der chemischen Prozesse erfassen zu können, wurden nun auch Messungen mit Höhenforschungsflugzeugen in der Arktis durchgeführt. „Wir haben in Zyklen von immer neuen Messkampagnen in den Polarregionen und darauf beruhenden Modellverbesserungen unser Verständnis des Abbauprozesses immer weiter vorangetrieben", sagt Markus Rex. „Bis wir im Jahr 2011 endlich so weit waren, dass unser Modell die Realität bis auf kleine Unsicherheiten abbilden konnte."

Auf Basis dieses guten Prozessverständnisses wurde dann das mathematische Modell ATLAS entwickelt. Es wird mit meteorologischen Daten gefüttert und ermittelt dann für die ganze Welt, wie sich die Konzentration des Ozons und anderer für die Ozonschicht wichtiger Spurengase an verschiedenen Orten laufend verändert. Heutzutage lässt sich damit die Ozonverteilung weltweit sehr gut abbilden. →





Wo sich Perlmuttwolken am Himmel über der Arktis bilden, wird Ozon abgebaut. Der Grund: Die Wolken aus Salpetersäure und Wasser verwandeln die normalerweise harmlosen Abbauprodukte der vom Menschen freigesetzten Fluorchlorkohlenwasserstoffe und Halone in ein gefährliches Gemisch aus Radikalen, welches Ozon zerstört.

Wie beeinflusst der asiatische Monsun die Ozonschicht der Erde? Um diese Frage zu beantworten, ließ ein internationales Wissenschaftlerteam unter der Leitung des AWI im Sommer 2017 das Höhenforschungsflugzeug M55-Geophysika über Nepal, Indien und Bangladesch aufsteigen. Seine Messungen geben Aufschluss über die Zusammensetzung der Luft in bis zu 20 Kilometer Höhe.

2,5 Billionen Rechenschritte für den Blick in die Zukunft

ATLAS ist ein Mammut-Modell. Es berücksichtigt 170 verschiedene Reaktionen von 49 chemischen Verbindungen, die mehr oder weniger stark mit dem Ozon verquickt sind. Außerdem verarbeitet es Parameter wie Temperatur, Luftdruck oder Sonneneinstrahlung. „Um die Veränderung der Ozonkonzentrationen zu ermitteln, muss das Modell eine ungeheure Menge einzelner Berechnungen vollziehen", sagt Markus Rex. „Wir haben das einmal abgeschätzt: Wenn wir das komplexe Modell 100 Jahre in die Zukunft blicken lassen, muss es 2,5 Billionen Male ausrechnen, wie sich die Ozonschicht an einem Punkt der Erde aufgrund von chemischen Prozessen in Abständen von jeweils wenigen Minuten verändert."

Damit ist ATLAS zwar ein ausgesprochen detailliertes, aber zugleich sehr langsames Rechenprogramm. „Es braucht ungleich mehr Rechenzeit als etwa ein klassisches Erdsystemmodell", sagt Markus Rex. Und das war bis vor kurzem ein Problem für seine aktuelle Arbeit: die Klärung der Frage, wie sich Ozonschicht und Klimasystem im Detail gegenseitig beeinflussen. Dazu wäre es sinnvoll, das Atmosphärenchemie-Modell ATLAS mit klassischen Klimamodellen zu koppeln. „Dabei würde ATLAS die Klimamodelle aber komplett ausbremsen und langfristige Berechnungen unmöglich machen", sagt der AWI-Atmosphären-Wissenschaftler. „Wir mussten daher einen Weg finden, die Ozonschicht in der Modellierung des Klimasystems zu berücksichtigen, ohne dafür das viel zu behäbige ATLAS-Modell einzusetzen."

Schlaue Software koppelt Ozon- und Klimamodell

Vor einem Jahr hatten Markus Rex und seine Mitarbeiter den Prototyp der Lösung fertig – eine Software, die ATLAS und die klassischen Klimamodelle geschickt koppelt. „SWIFT" heißt dieses flinke Bindeglied. SWIFT führt selbst keine Berechnungen der Atmosphärenchemie durch. Vielmehr schaut es ATLAS beim Denken zu und lernt gewissermaßen Wertekombinationen auswendig: bestimmte Kombinationen von Temperatur, Luftdruck und den Konzentrationen der beteiligten chemischen Verbindungen, bei denen es jeweils zu einer bestimmten chemisch bedingten Veränderung der Ozonkonzentration kommt. Wenn man so will, lernt es, Momentaufnahmen der Ozonchemie zu erkennen und den jeweiligen chemischen Effekt an das Klimamodell weiterzugeben. „Das reduziert den benötigten Rechenaufwand, wenn man die Ozonchemie im Klimamodell berücksichtigt, enorm", sagt Markus Rex. Damit wird jetzt eine Kopplung möglich.

Markus Rex interessiert sich derzeit unter anderem für die Frage, wie das Schrumpfen des arktischen Meereises mit den Klimaänderungen der Nordhemisphäre zusammenhängt und welche Rolle die Ozonschicht dabei spielt. Vieles deutet darauf hin, dass die Ozonkonzentration hier zu einem positiven Rückkopplungsprozess beiträgt. So ist bekannt, dass die Ozonschicht einen Teil der einfallenden Sonneneinstrahlung als Wärme an die Stratosphäre weiter gibt. Im Winter, wenn die Arktis im Dunkel liegt, kühlt die Stratosphäre ab. Da Ozon bei starker Kälte abgebaut wird, geht diese wärmende Wirkung der Ozonschicht im Frühjahr zurück, sodass die Stratosphäre dann noch weiter auskühlt. Betrachtet man die gesamte Nordhalbkugel, ergibt sich daraus ein größerer Temperaturunterschied zwischen



den Tropen und der Arktis. In der Folge bildet sich zwischen den warmen Luftmassen im Süden und den kalten im Norden ein stabilerer Wirbel aus, der die Arktis stärker isoliert und das Nachströmen warmer Luft aus gemäßigteren Breiten unterdrückt.

Schneestürme in den USA, warme Winter in der Arktis

Schrumpft das arktische Meereis, führen dynamische Prozesse zu einer Erwärmung der Stratosphäre. Die Folge: Der Ozonabbau, der ja bei großer Kälte stattfindet, wird gebremst. Damit kann die Ozonschicht mehr Wärme in der Stratosphäre halten. Das wiederum führt dazu, dass der Temperaturunterschied zwischen den Tropen und der Arktis im Winter geringer ist. Der arktische Wirbel wird dadurch instabiler und beginnt zu mäandrieren. Dieses Phänomen setzt sich bis zum Erdboden fort. „Das kann zu vermehrten und intensiveren Kaltlufteinbrüchen aus der Arktis in die mittleren Breiten führen“, sagt Markus Rex. „Ein Beispiel sind die Schneestürme, welche die US-Ostküste in den letzten Jahren immer öfter heimsuchen“. In umgekehrter Richtung kann durch das Mäandrieren der Westwindströmung verstärkt warme Luft in die Arktis vorstoßen und dort die Eisschmelze verstärken. Dieser Mechanismus lässt sich nun mit dem neuen gekoppelten Ozon-Klimamodell reproduzieren und genauer untersuchen. Noch sind hier viele Fragen offen und Gegenstand aktueller Forschung. Etwas anderes aber ist gewiss: Die Ozonschicht konnte sich mit dem Verbot der ozonzerstörenden Gase langsam erholen. Seit einigen Jahren steigt die Ozonkonzentration in großer Höhe wieder an. Die Hiobsbotschaften aus dem Jahr 1987 werden sich durch das entschiedene Einschreiten der internationalen Umweltpolitik nicht bewahrheiten. Und das ist mal eine wirklich gute Nachricht. //

KOMPAKT

- **Für das Leben auf der Erde spielt das Ozon eine wichtige Rolle, weil die Ozonschicht einen großen Teil der schädlichen ultravioletten Strahlung aus dem Sonnenlicht filtert. Weniger bekannt ist, dass das Ozon in der Atmosphäre auch das Klima stark beeinflusst.**
- **Seit einigen Jahren gibt es mathematische Modelle, die für den gesamten Globus die Bildung und den Abbau von Ozon berechnen können. Weil diese rechenintensiv sind, konnte man sie lange nur sehr schlecht mit Klimamodellen koppeln. Dank einer neuen AWI-Software ist jetzt eine Verknüpfung möglich, sodass man den Einfluss des Ozons auf das Klima besser simulieren kann.**
- **Durch das Verbot ozonzerstörender Gasen erholt sich die Ozonschicht seit einigen Jahren. Das internationale Abkommen von Montreal, mit dem im Jahr 1989 der Ausstieg aus der Produktion vereinbart wurde, ist damit bis heute ein Beispiel dafür, dass sich Umweltschutz international erfolgreich durchsetzen lässt, wenn alle Nationen an einem Strang ziehen.**



Er sieht aus wie ein Torpedo, bleibt aber stets über Wasser: Der AWI-Meereisdickensensor „EM-Bird" vermisst die Dicke des arktischen Meereises aus der Luft. Dazu wird das Gerät von einem Forschungsflugzeug über die Eis- und Wasserflächen geschleppt. Ein anspruchsvolles Flugmanöver, denn der EM-Bird muss für genaue Messungen in einer Höhe von 15 Metern über dem Ozean schweben.



MESSUNGEN AUS DER VOGELPERSPEKTIVE

Weil die Satellitentechnik im Sommer an ihre Grenzen stößt, besteigen die AWI-Meereisphysiker Thomas Krumpen und Stefan Hendricks regelmäßig eines der zwei AWI-Forschungsflugzeuge, um das arktische Meereis großflächig aus der Luft zu vermessen. Während sie dabei mit bloßem Auge nur kleine Anzeichen eines Wandels entdecken, erzählen die Messdaten von grundlegenden Veränderungen, deren Ursachen vielschichtig sind.

Interview: **SINA LÖSCHKE**

Herr Krumpen, Herr Hendricks, seit mehr als zehn Jahren vermessen Sie vom Hubschrauber oder vom Flugzeug aus die Dicke des arktischen Meereises. Wenn Sie dabei auf das Eis hinunterschauen und ihre Eindrücke von heute mit jenen von vor zehn Jahren vergleichen – welches sind die gravierendsten Unterschiede?



Dr. Thomas Krumpen

leitet die regelmäßigen Sommer-Meereismesskampagnen vor der Nordostküste Grönlands und forscht u. a. zu der Frage, wieviel arktisches Meereis über die Framstraße in den Nordatlantik treibt.

Thomas Krumpen: *Das Meereis in der Arktis hat sich in den zurückliegenden 40 Jahren großflächig verändert. Zum einen ist seine Sommerausdehnung seit Beginn der Satellitenmessungen im Jahr 1978 um bis zu zwölf Prozent pro Jahrzehnt geschrumpft. Zum anderen ist es dünner geworden. Das genaue Ausmaß dieser Veränderungen unterscheidet sich jedoch von Region zu Region und hängt auch von der Jahreszeit ab. Wenn wir heutzutage während eines Sommer-Messfluges aus dem Flugzeugfenster schauen, erkennen wir nur kleine Details des Wandels. An einigen Stellen, wo früher dickes, mehrjähriges Eis zu finden war, treibt heute überwiegend dünnes Eis. Statt endlos weißer Flächen sehen wir inzwischen aber auch viel Türkis und Blau, denn dort, wo sich Schmelzwasser auf der Eisoberfläche sammelt, wird das Eis schnell dünner und der dunkle Ozean schimmert von unten durch.*

Stefan Hendricks: *Diese Schmelzwassertümpel sind für uns ein echtes Problem. Überall dort, wo Wasser auf dem Eis steht, versagt nämlich das Radar des Meereis-Satelliten CryoSat-2. Das bedeutet, wir erhalten gerade in den wichtigen Sommermonaten keine großflächigen Satellitendaten zur Dicke des Meereises, sondern sind auf die Messdaten unserer Flugkampagnen angewiesen.*

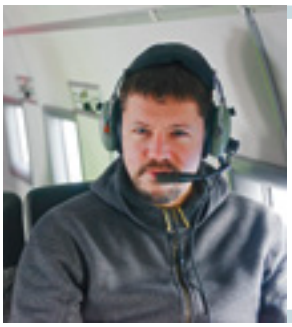
In welche Regionen der Arktis führen Ihre Messflüge?

Stefan Hendricks: *Wir konzentrieren uns auf drei Regionen. Die erste Flugzeugkampagne des Jahres führt im Frühling in den Westen der Arktis, genauer gesagt in die Region zwischen Grönland und Alaska. In diesem Meeresgebiet mit verhältnismäßig dickem Eis sammeln wir seit mehr als 20 Jahren Daten. Im Juli und August vermessen wir dann von einem kleinen Flughafen im Nordosten Grönlands aus jene Meereisflächen, die vor der Nordküste Grönlands treiben und im Laufe des Sommers den Arktischen Ozean über die Framstraße verlassen. Hinzukommen die vielen Helikopter-Messflüge, welche wir auf Expeditionen des Forschungseisbrechers Polarstern in die zentrale Arktis durchführen. Ein straffes Programm!*

Welche Eisparameter messen Sie genau?

Thomas Krumpen: *Auf unseren Flügen mit den Forschungsflugzeugen Polar 5 und 6 setzen wir unseren Meereisdickensensor „EM-Bird" sowie ein Schneeradar und einen Laser-Höhenmesser ein. Auf diesem Wege erfassen wir zeitgleich drei Kenngrößen: die Meereisdicke, die Höhe der Schneedecke auf dem Eis sowie das sogenannte Freibord – also die Angabe, wie weit eine Eisscholle aus dem Wasser herausragt.*

Stefan Hendricks: *Alle Messdaten fließen in unsere AWI-Meereisdatenbank ein, in der wir außer den Flugzeug- und Satellitendaten auch die Daten unserer frei driftenden Meereisbojen sowie die Ergebnisse unserer Messungen auf dem Eis sammeln. Dieser Datensatz erlaubt es uns zum einen, genaue Prozessstudien durchzuführen, bei denen es darum geht, bestimmte physikalische Größen über, im und unter dem Eis zu untersuchen. Zum anderen dienen die Daten als Grundlage für unsere Meereis-Modellierungen und -vorhersagen. Unsere Sektion deckt damit von der Detailmessung im Feld bis hin zur Modellierung alle Teilbereiche der Meereisphysik ab. Die Tatsache, dass uns außerdem ein Forschungseisbrecher mit Hubschraubern sowie zwei Flugzeuge für Messkampagnen zur Verfügung stehen, zeichnet die AWI-Meereisphysik auch im internationalen Vergleich wirklich aus.* →



Dr. Stefan Hendricks

verantwortet die Frühlings-Meereismesskampagnen, die ihn meist von Spitzbergen bis Alaska führen. Dabei konzentriert er sich auf die Frage, inwieweit sich die Meereisdicke in den verschiedenen Meeresregionen verändert hat.



Das AWI-Forschungsflugzeug Polar 6 ist auf dem Flugfeld von Longyearbyen (Spitzbergen) gelandet und wartet auf seine Einrüstung. Bevor die Meereisdickenmessungen beginnen können, muss das Wissenschaftlerteam sein wichtigstes Messgerät, den EM-Bird, an einer Winde am Rumpf des Flugzeuges befestigen.



Bei den Messflügen kommen die Wissenschaftler und Flugzeugpiloten häufig in den Genuss eines atemberaubenden Ausblicks auf die arktische Landschaft. Diese Aufnahme zeigt die Küstenregion und Gletscher im Norden Grönlands.

Welche Veränderungen zeigt der Langzeitdatensatz?

Thomas Krumpen: *Für die Framstraße können wir eine deutliche Abnahme der Meereisdicke belegen. Während der Wert für die am häufigsten gemessene Eisdicke im Jahr 2002 noch bei 2,1 Meter lag, sind wir jetzt bei 1,20 Meter angelangt – das ist eine Abnahme von fast 50 Prozent, für die eine Vielzahl von Faktoren verantwortlich ist. Zum einen lässt sich die Abnahme der Eisdicke auf den Rückgang des mehrjährigen Eises zurückführen, welches bislang deutlich dicker ist als einjähriges Eis. Eine wichtige Rolle spielen auch die wärmer werdenden Winter, im Zuge derer weniger Eis neu gefriert. Wir nehmen zudem an, dass der Ozean länger in den Winter hinein Wärme an die Atmosphäre abgibt und das Eiswachstum auf diese Weise bremst. Zu beachten sind außerdem Veränderungen in den Driftmustern und der Driftgeschwindigkeit des Eises.*

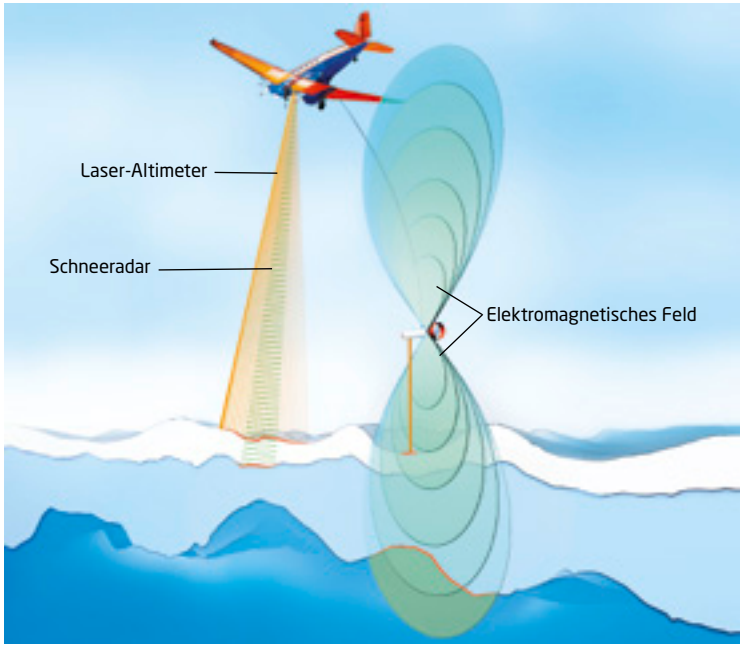
Stefan Hendricks: *Wir wissen zum Beispiel noch nicht genau, ob die zunehmende Driftgeschwindigkeit des Meereises bedeutet, dass insgesamt betrachtet mehr Eis den Arktischen Ozean über die Framstraße verlässt. Auf die Eisfläche bezogen, mag das stimmen. Da die Schollen aber dünner sind, deutet derzeit einiges darauf hin, dass die Zunahme in der Fläche durch die Abnahme in der Dicke kompensiert wird und der Eisvolumenexport derzeit rückläufig ist.*

Thomas Krumpen: *Der große Vorteil unserer Messungen in der Framstraße ist, dass wir hier auf Meereis stoßen, welches vor allem in den russischen Schelfgebieten gebildet wurde. Das heißt, wir können von unseren Messergebnissen auf komplexe Veränderungen schließen, die in großen Teilen des Arktischen Ozeans vonstattengehen. Den Rückgang der Eisbedeckung nehmen wir außerdem zum Anlass, genauer zu untersuchen, welchen Einfluss die im Sommer vom Ozean aufgenommene Wärme auf die Eisbildung im darauffolgenden Winter ausübt.*

3 500

KILOMETER

Eisdickendaten sammeln die AWI-Meereisphysiker im Durchschnitt auf einer Flugzeugmesskampagne. Sie dienen im Anschluss unter anderem auch dazu, die Messergebnisse des Meereis-Satelliten CryoSat-2 zu überprüfen.



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.

Sind die Ergebnisse für das dicke Eis im Norden Kanadas ebenso eindeutig wie für die Framstraße?

Stefan Hendricks: *Nein, was aber u. a. daran liegt, dass wir mit unseren bis zu 1 200 Kilometer langen Messflügen trotzdem nur eine verhältnismäßig kleine Eisfläche der kanadischen Arktis abdecken. Vor zehn Jahren konnten wir in der Lincolnsee vor der Nordwestküste Grönlands auch nur Helikoptermessungen durchführen und mussten dicht vor der Küste bleiben. Wenn im Folgejahr dann auch noch eine Messkampagne wegen schlechten Wetters ausfällt, hat die Zeitreihe wenig Aussagekraft. Aus diesem Grund arbeiten wir derzeit daran, Satellitendaten zu erschließen, die bis in das Jahr 1993 zurückreichen und bisher nicht ausreichend validiert und ausgewertet werden konnten. Der große Vorteil der Satellitendaten ist nämlich, dass sie einen großflächigen Überblick geben, besonders für die Wintermonate November bis April. Das ist jene Zeit, in der sich das Meereis neu bildet, in der wir aber aus Sicherheitsgründen keine Messflüge durchführen können.*

Thomas Krumpen: *Die Satellitendaten zeigen uns das große Ganze und legen offen, wie viel Meereis es in der Arktis gibt. Bei unseren flugzeug- und hubschraubergestützten Messungen schauen wir deutlich tiefer ins →*



AWI-Techniker Manuel Sellmann überwacht während eines Messfluges die einlaufenden Daten, während sein Kollege Thomas Krumpen im Hintergrund die Flughöhe des EM-Bird kontrolliert. Die gesamte Messtechnik an Bord muss so leicht wie möglich sein, damit das Flugzeug wenig Treibstoff verbraucht und lange Distanzen fliegen kann.

Detail und gehen der Frage nach: Welche physikalischen Prozesse sind dafür verantwortlich, dass genau diese Eismenge da ist? Um solche Feinheiten zu untersuchen, reicht die Auflösung der Satellitendaten nicht aus.

Das heißt, sowohl die Flugzeug-Messungen als auch die Messungen der Satelliten werden künftig gefragt sein?

Stefan Hendricks: *Auf jeden Fall. Wir werden auch in Zukunft regelmäßig mit dem Hubschrauber und den Flugzeugen das Meereis vermessen. Gleichzeitig aber stehen wir vor der Herausforderung, neue und alte Satellitendaten noch besser zu nutzen, um unsere Aussagen zum Zustand und zur Zukunft des arktischen Meereises auf eine noch bessere Datenbasis zu stellen.* //

KOMPAKT

- **Die Fläche des arktischen Meereises ist seit Beginn der Satellitenmessungen im Jahr 1978 um mehr als 30 Prozent geschrumpft. Außerdem ist das Eis heute deutlich dünner als früher.**
- **Im Zuge des Meereisrückganges verändern sich auch die Driftmuster und die Driftgeschwindigkeit des Eises. Die Schollen treiben heute schneller über den Arktischen Ozean als früher.**
- **Um die Veränderungen zu verstehen, untersuchen die AWI-Forscher das Meereis mithilfe von Satelliten, auf regelmäßigen Flugzeug-Kampagnen und bei Schiffsexpeditionen direkt auf und unter dem Eis.**

EINSATZBEREIT BEI SCHNEE UND KÄLTE

AWI-Elektroingenieur Jan Rohde wartet mit dem EM-Bird das anspruchsvollste Gerät der Meereisphysik



Wer Jan Rohde auf einer Expedition dabei hat, kann sich sicher fühlen. Der 29-jährige Elektroingenieur war lange Zeit beim Jugendrotkreuz aktiv. Später wechselte er zum Technischen Hilfswerk. Erste Hilfe kann er aus dem Effeff. Und auch einer Maschine oder einem Motor kann er helfen, wenn der oder die einmal streiken sollte. Das ist gut so, denn künftig wird Jan Rohde für eines der anspruchsvollsten Geräte verantwortlich sein, die das AWI in der Meereisforschung zu bieten hat: den EM-Bird.

Mit dem Apparat messen seine AWI-Kollegen, die Meereisphysiker Stefan Hendricks und Thomas Krumpen, vom Flugzeug aus die Dicke des Meereises in den Polarregionen. Der EM-Bird arbeitet 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 – Eis oder Salzwasser zum Beispiel.

Bislang waren Stefan Hendricks und Thomas Krumpen allein für den EM-Bird zuständig. Mit Jan Rohde haben sie sich jetzt Verstärkung geholt, denn „das Messinstrument ist ein ziemlich komplexer Apparat mit Sender, Empfänger und empfindlicher Messtechnik", sagt Jan Rohde. „In dem Gehäuse stecken gleich mehrere Technologien, von denen jede für sich schon recht anspruchsvoll ist." Dazu gehören zum Beispiel der Signalerzeuger, der die elektromagnetischen Wellen abgibt, und der Empfänger. Beide müssen perfekt abgestimmt sein, damit klare Signale entstehen. Diese werden im EM-Bird in Daten umgewandelt, die der Computer an Bord des Flugzeugs auswerten kann. Hinzu kommt, dass die Technik bei minus 30 Grad funktionieren und alle Platinen und Kabel auch nach Start oder Landung fest zusammenhalten müssen. Wackelkontakte kann sich das Team während einer Flugkampagne nicht leisten.

Und sollte doch ein Draht nicht mitspielen, wird Jan Rohde die Schwachstelle finden. Für seine Masterarbeit an der Technischen Universität Braunschweig hat der Elektroingenieur mit dem Schwerpunkt Nachrichtentechnik einen Funkempfänger für eine Drohne gebaut, der die Feldstärke von Drehfunkfeuern messen kann. Das sind jene UKW-Sendeanlagen, mit deren Hilfe Flugzeuge ihre Position bestimmen – ein anspruchsvolles Projekt mit einem Gerät, das robust für einen harten Alltagseinsatz sein muss; ganz so wie der EM-Bird.

















WER WISSEN TEILT, LERNT AM MEISTEN

Das Klimasystem unserer Erde ist so komplex, dass es Experten verschiedener Disziplinen braucht, um es zu verstehen. Der Helmholtz-Forschungsverbund REKLIM bringt sie zusammen. Hier kooperieren Geologen, Gletscherexperten und Luftchemiker, Hydrologen und Atmosphärenphysiker, Permafrost-Fachleute und Modellierer. Ihr gemeinsames Ziel: die regionalen Auswirkungen des Klimawandels verstehen und vermitteln.

Den Klimawandel vor der Haustür verstehen

Den Klimawandel werden Menschen künftig zuallererst an Veränderungen in ihrer vertrauten Heimat wahrnehmen. Im Forschungsverbund REKLIM arbeiten deshalb Experten von neun Helmholtz-Zentren und verschiedenen Universitäten daran, die regionalen Folgen des Klimawandels genauer zu verstehen. Ein weiteres Ziel ist zudem, das Fachwissen direkt der Öffentlichkeit und gesellschaftlichen Akteuren zur Verfügung zu stellen.

Text: **TIM SCHRÖDER**



Dr. Klaus Grosfeld koordiniert als REKLIM-Geschäftsführer alle Aktivitäten des Helmholtz-Forschungsverbundes zu regionalen Klimaänderungen und initiiert viele innovative Wissenstransfer-Projekte.

Von Berlin bis zum nördlichen Polarkreis sind es rund 1 500 Kilometer. Eine ziemlich weite Strecke, könnte man meinen. Genau genommen aber liegt die Arktis dichter vor unserer Haustür als zum Beispiel Madrid, weshalb gerade wir Mitteleuropäer uns angesichts der starken Klimaveränderungen im hohen Norden die Frage stellen müssen: Wie wird sich der Klimawandel in unserer Heimat auswirken?

Dieser drängenden Frage gehen die Wissenschaftler des Forschungsverbundes Regionale Klimaänderungen (REKLIM) nach, einen Zusammenschluss von Forschenden aus neun Helmholtz-Zentren und verschiedenen Universitäten. „Das Tolle an diesem Verbund ist, dass wir Wissenschaftler aus Fachgebieten zusammenbringen, die normalerweise so nicht miteinander arbeiten. Dadurch können wir ganz neue Erkenntnisse gewinnen“, sagt der AWI-Geophysiker und REKLIM-Geschäftsführer Dr. Klaus Grosfeld. Insgesamt acht Forschungsschwerpunkte gibt es in REKLIM – etwa zum Meeresspiegel und dessen Auswirkungen auf die Küstenregionen oder zur Zusammensetzung der Atmosphäre und deren Wirkung auf das Klima.

Wie schnell ändert sich das Klima?

Von besonderem Interesse sind zum Beispiel die sogenannten abrupten Klimaveränderungen. Klaus Grosfeld erklärt, was es damit auf sich hat: „Klimawandel hat es im Laufe der Erdgeschichte schon immer gegeben. In der Regel läuft dieser langsam innerhalb von Jahrtausenden ab. Wissenschaftliche Ergebnisse aber deuten darauf hin, dass es immer wieder Phasen gab, in denen sich das Klima innerhalb weniger Jahrzehnte massiv geändert hat.“

Diese Erkenntnis ist beunruhigend, denn möglicherweise stehen der Menschheit mit dem anthropogenen Klimawandel schon in naher Zukunft genau solche abrupten Änderungen ins Haus. „Wir gehen davon aus, dass es bestimmte Punkte gibt, an denen das Klimasystem plötzlich in einen neuen Zustand kippt“, sagt Klaus Grosfeld.

Da die Zukunft nicht bekannt ist, blicken die Wissenschaftler in die Vergangenheit. Im REKLIM-Schwerpunkt „Schnelle Klimaänderungen aus Proxy-Daten“ versuchen sie, Phasen der Erdgeschichte zu finden, in denen es solche Kipppunkte gab. Die Hoffnung: Versteht man die Vergangenheit besser, lässt sich eventuell abschätzen, ob wir mit dem aktuellen Klimawandel auf solche Kipppunkte zusteuern. →



REDEN IST SILBER, DISKUTIEREN IST GOLD

Auf den jährlichen REKLIM-Konferenzen bleiben die Forschenden schon lange nicht mehr unter sich. Inzwischen sind bis zu 80 Prozent der Teilnehmenden politische Entscheidungsträger, Behördenvertreter, Umweltschützer und andere gesellschaftliche Akteure, die von den Experten Antworten auf Fragen zum regionalen Klimawandel benötigen.











Die Fragestellung ist anspruchsvoll und lässt sich nur beantworten, wenn Experten verschiedener Fachgebiete zusammenarbeiten. REKLIM macht dies möglich. Bei der Suche nach abrupten Klimaveränderungen in der Vergangenheit spielen marine Sedimente eine wichtige Rolle. Je nach klimatischen Bedingungen leben im Wasser andere Organismen. Sterben diese, sinken sie ab. Reste von ihnen werden im Sediment eingelagert. Legt man diese Schichten frei, kann man analysieren, wann bestimmte Organismen lebten und welche klimatischen Bedingungen zu dieser Zeit geherrscht haben müssen.

Der AWI-Geologe Prof. Dr. Ralf Tiedemann ist einer der Experten, die in den Sedimenten lesen können. Er ist auf Meeressedimente spezialisiert. „Ein Problem für uns besteht darin, dass es immer nur Daten von wenigen Messpunkten gibt. Damit lässt sich schwer abschätzen, ob Klimaänderungen nur regional oder global auftraten. Wir verfügen zum Beispiel über Daten aus dem Atlantik oder dem Pazifik – aber nicht aus Mitteleuropa", so der AWI-Experte.

Deshalb kooperiert er in REKLIM mit Prof. Dr. Achim Brauer vom Deutschen GeoForschungsZentrum (GFZ) in Potsdam, der seit vielen Jahren an Sedimenten in Seen arbeitet – etwa am Ammersee und an Seen in Italien. Gemeinsam vergleichen sie ihre jeweiligen Informationen über Klimaänderungen mit jenen Daten, die AWI-Glaziologen und Experten der Universität Heidelberg jahrtausendealten Eisbohrkernen entnommen haben. Drei Quellen geben schließlich mehr Gewissheit als eine.

Kooperation erlaubt neue Entdeckungen

Doch REKLIM bietet noch mehr. Die gewonnenen Daten werden gemeinsam mit den Klimamodellierern am AWI diskutiert. Sie simulieren damit das Klima der Vergangenheit. Inzwischen gibt es einige interessante Entdeckungen: Offenbar gab es in der Phase vor der letzten Eiszeit zunächst lange Warmperioden von mehreren 1 000 Jahren, die innerhalb weniger Jahrzehnte in sehr kalte Phasen kippten. Dann folgten umgekehrt lange kalte Phasen, die innerhalb kurzer Zeit wieder in Warmphasen umschlugen, bevor schließlich die ganze kalte Phase der Eiszeit →

„DIE ANTWORT AUF DIE FRAGE, WIE VIEL GELD WIR FÜR DEN KLIMASCHUTZ IN DIE HAND NEHMEN MÜSSEN"

Bremen und Bremerhaven wollen in Kürze eine neue Strategie zur Anpassung an den Klimawandel verabschieden. Dabei geht es unter anderem um den Schutz vor Hochwasser oder Hitzewellen. Bei der Ausarbeitung der Maßnahmen wurden die Behörden durch REKLIM-Experten unterstützt. Dr. Christof Voßeler, bei der Freien Hansestadt Bremen für Klimaanpassung und Offshore-Windenergie zuständig, erläutert, warum der Austausch mit externen Fachleuten so wichtig ist.



Dr. Christof Voßeler
Referent für Anpassung an den Klimawandel und Offshore Windenergie beim Bremer Senator für Umwelt, Bau und Verkehr

Herr Voßeler, eine Anpassungsstrategie ist ein Großprojekt mit vielen Maßnahmen. Was ist zu bedenken, um eine Stadt wie Bremen auf den Klimawandel vorzubereiten?
Als Küstenstandort steht natürlich der Schutz vor Hochwasser im Vordergrund. Wir erwarten aber auch eine Zunahme von Starkregenereignissen. Davon sind vor allem Aspekte der Stadtentwässerung und der Stadtplanung berührt. Auch wenn wir in Norddeutschland ein gemäßigtes Klima haben, erwarten wir außerdem, dass die Zahl und Dauer der Hitzewellen zunehmen. Auch hier ist die Stadtplanung gefragt: So ist zu überlegen, wie man zum Beispiel durch Erhalt von Frischluftschneisen und Grünflächen die bioklimatische Situation bei Hitze erhalten oder sogar verbessern kann. Hier kommen sehr viele Aspekte zusammen, bei denen wir auch auf die Unterstützung durch externe Experten angewiesen sind.

Inwiefern benötigen Sie Expertise von außen?
Als Behörde müssen wir Entscheidungsgrundlagen vorbereiten; für Entscheidungen darüber, welche Maßnahmen wir heute für die Zukunft umsetzen sollen, obwohl die Folgen des Klimawandels noch nicht mit Sicherheit vorauszusehen sind. Die Politik muss dann entscheiden, wie viel Geld wir heute für die Zukunft in die Hand nehmen. Beispielsweise ist noch nicht völlig klar, wie sich der Meeresspiegelanstieg in unserer Region ausprägen wird. Dank der Gespräche mit den REKLIM-Kollegen und deren aktuellen wissenschaftlichen Erkenntnissen, wissen wir, dass der Meeresspiegel trotz aller Unwägbarkeiten höher ausfallen könnte, als noch vor wenigen Jahren erwartet. Sollten sich diese Analysen weiter bestätigen, kann sich das Land vorbereiten und den Hochwasserschutz rechtzeitig anpassen.

Wäre es dann nicht sinnvoll, schon heute für den „worst case" zu planen?
Beim Hochwasserschutz werden bereits sehr weitgehende Risikoszenarien eingerechnet. Generell müssen wir aber bei allen Themen der Klimaanpassung über Jahrzehnte in die teils ungewisse Zukunft planen. Die Anpassung an den Klimawandel steht als Langfrist-Thema zudem im täglichen politischen Diskurs in Konkurrenz zu Themen wie Bildung, Migration oder Kita-Plätzen, die kurzfristig zu lösen sind. Wie viel Geld sollten und können wir heute der Klimaanpassung widmen? Bei der Kostenschätzung und Nutzenbewertung ist das Wissen von außen enorm wichtig, um in der Diskussion eine stichhaltige Abwägungs- und Argumentationsgrundlage zu haben.

„Wissenschaft" und „Behörde" sind zwei verschiedene Welten. Wie klappt es da mit der Verständigung?
Erstaunlich gut. Ich bin im Jahr 2015 durch die REKLIM-Konferenz hier in Bremen auf REKLIM aufmerksam geworden. Mich hat damals die Praxisnähe und Verständlichkeit der wissenschaftlichen Vorträge begeistert. Daraus ist dann ein engerer Kontakt entstanden. Andererseits denken wir zum Teil anders als Forscher. Wissenschaftler versuchen zum Beispiel einzuschätzen, wie stark der Meeresspiegel steigen wird – und geben eine Spannweite für die mögliche Zunahme an. Wir denken auch an die Konsequenz und Umsetzbarkeit von Maßnahmen und fragen uns, wie lange einzelne Maßnahmen den gewünschten Schutz gewährleisten. Solche Schwellen, bei denen Maßnahmen umgesetzt werden müssen, kann man nicht einfach aus den wissenschaftlichen Daten ableiten. Inzwischen kennen wir die Denkweise des jeweils anderen aber sehr gut.

„Ich arbeite seit vielen Jahren für den Fachbereich Klimawissenschaften und den REKLIM-Forschungsverbund im Bereich des Wissenstransfers – also an der Schnittstelle zwischen Wissenschaft und Gesellschaft. Diese Aufgabe ist sehr wichtig, weil wir so dazu beitragen, unsere Forschungsergebnisse für unterschiedliche Akteure verständlich und zugänglich zu machen. An meiner Arbeit faszinieren mich die Vielseitigkeit der Themen, die Bandbreite der Menschen, mit denen wir gemeinsam Projekte entwickeln, und die Begeisterung, die die Menschen unserer wissenschaftlichen Arbeit entgegenbringen."



DR. RENATE TREFFEISEN
Leiterin des Klimabüros für Polargebiete und Meeresspiegelanstieg

DARUM LIEBE ICH MEINEN JOB

begann und weite Teile der Nordhalbkugel vergletscherten.
Der Vergleich der Daten aus Meeressedimenten, Seesedimenten und Eisdaten zeigt, dass es während der abrupten Übergänge auf der ganzen Nordhalbkugel auffällige Änderungen in den Meeresströmungen und in der Atmosphäre gab. „Ohne REKLIM hätten wir solche Ergebnisse kaum erzielen können", sagt Achim Brauer vom GFZ. „Durch die Netzwerk-Treffen lernt man die anderen Kollegen und ihre Arbeit viel besser kennen. Außerdem schafft der Verbund eine Verbindlichkeit, welche die Zusammenarbeit beflügelt. Das ist etwas anderes als beim Kaffee locker zu verabreden, dass man künftig zusammenarbeiten könnte."

343 296
MAL

wurde die Website meereisportal.de vom 1. Januar 2015 bis 31. Dezember 2017 angeklickt, Tendenz steigend. Das Meereisportal ist in REKLIM entstanden und trägt dazu bei, Expertenwissen in die Öffentlichkeit zu bringen. Es liefert aktuelle Daten über den Zustand und die Ausdehnung des Meereises in der Arktis und Antarktis und ist bei privaten Nutzern und Wissenschaftlern gleichermaßen beliebt.

Den regionalen Klimawandel umfassend bearbeiten

Was die Zusammenarbeit zwischen den verschiedenen Disziplinen und die Themenvielfalt angeht, hat REKLIM eine enorme Spannbreite zu bieten. Zwei Beispiele: Im Schwerpunkt „Gekoppelte Modellierung regionaler Erdsysteme" werden neue Methoden entwickelt, mit denen die Forscher künftig besser modellieren wollen, wie sich der globale Klimawandel regional auswirkt. Im Schwerpunkt „Modellierung und Verständnis extremer meteorologischer Ereignisse" befassen sich die Experten mit extremen Wetterereignissen wie Hagelschauern. Solche Einzelereignisse können Versicherungsschäden in Milliardenhöhe verursachen – durch Zerstörung von Solaranlagen, Glasdächern oder Verluste in der Landwirtschaft. Geklärt werden soll unter anderem, wie man künftig damit umgehen kann, wenn solche Wetterextreme zunehmen. „Eine solche Vielfalt und Verknüpfung regionaler Klimaaspekte wie in diesem Netzwerk gibt es in ganz Europa sonst nicht", sagt REKLIM-Geschäftsführer Klaus Grosfeld.

Das Wissen nach außen tragen

Die Erforschung des regionalen Klimawandels ist vor allem auch deshalb interessant, weil er den Alltag der Menschen unmittelbar betrifft. Ein Ziel von REKLIM ist es deshalb, die neuesten Erkenntnisse in die Öffentlichkeit zu tragen – beispielsweise mit dem Kooperationsprojekt „klimafit", das im März 2017 vom REKLIM-Verbund gemeinsam mit der Naturschutzorganisation WWF und den regionalen Bildungsträgern fesa e.V. und ifpro gestartet wurde. „Dieses Projekt verfolgt das Ziel, das Expertenwissen an Multiplikatoren in Weiterbildungskursen an Volkshochschulen weiterzugeben – an Architekten, Landwirte, Stadtplaner, Pädagogen oder auch die Klimaschutzmanager der Kommunen", so Dr. Renate Treffeisen, klimafit-Koordinatorin in REKLIM und Leiterin des Klimabüros für Polargebiete und Meeresspiegelanstieg am AWI. Neben Grundlagenwissen über den Klimawandel vermitteln die Kurse auch Lösungen, mit denen sich die Menschen in der Region an den Klimawandel anpassen können. „Ein solches Projekt ist in Deutschland bislang einzigartig", sagt Bettina Münch-Epple, Leiterin des Bildungsbereichs beim WWF. „Der Kurs setzt stark auf das „blended learning"-Konzept. Das

heißt, wir arbeiten sowohl mit Dozenten vor Ort als auch mit Klimaexperten, die per Video zugeschaltet werden." Dass die Teilnehmer einen direkten Draht zu den Wissenschaftlern haben, mache diesen Kurs besonders wertvoll. „klimafit" startet derzeit in sechs Kommunen in Südwestdeutschland. Die Region hat bereits heute mit den Folgen des Klimawandels zu kämpfen. „In manchen Regionen in Baden-Württemberg beträgt die Erderwärmung mehr als 1.5°C.", sagt Bettina Münch-Epple. Das wirke sich auf die Landwirtschaft aus. Die Zahl der extrem heißen Tage habe ebenso zugenommen wie Starkregenereignisse und Unwetter. „Im vergangenen Jahr fand ein erster Test des Kurses in der Kreisstadt Emmendingen bei Freiburg statt. Er ist bei den Teilnehmern so gut angekommen, dass wir vom Erfolg dieses Projektes überzeugt sind", betont Renate Treffeisen. In den kommenden Jahren sollen die Kurse dann in weiteren Regionen Deutschlands etabliert werden. „Wir möchten eine Lawine anstoßen", sagt Klaus Grosfeld, „damit das Thema Klimawandel die ganze Gesellschaft durchdringt. Das hat den schönen Nebeneffekt, dass die Forscher, die in REKLIM beteiligt sind, spüren, dass ihr Wissen benötigt wird." //

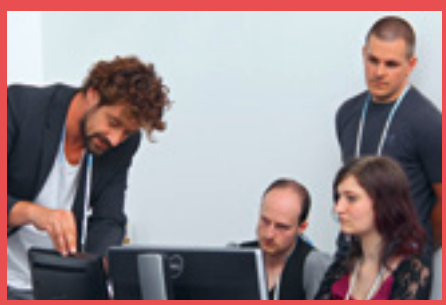
KOMPAKT

- **Im REKLIM-Verbund arbeiten Experten aus neun Helmholtz-Zentren und mehreren Universitäten gemeinsam daran, die Folgen des Klimawandels für die Regionen in Mitteleuropa und z. B. in der Arktis einzuschätzen.**
- **Eine Stärke des REKLIM-Verbundes ist sein interdisziplinärer und zentrenübergreifender Ansatz. Auf gemeinsamen Veranstaltungen kommen die Forschenden aus verschiedenen Fachgebieten zusammen und finden oft gemeinsam neue Antworten auf wissenschaftliche Fragen.**
- **REKLIM-Experten verstehen es als ihre Aufgabe, ihr Fachwissen der Gesellschaft zur Verfügung zu stellen – etwa durch beratende Tätigkeiten, durch öffentliche Klimakurse oder durch Infoportale im Internet.**













DER KLIMAWANDEL BRAUCHT VIELE BÜHNEN

Um die Menschen in den Städten und Gemeinden für die Veränderungen vor ihrer Haustür zu interessieren, lässt sich das Team der REKLIM-Geschäftsstelle viel einfallen. Es zeigt Filme auf der Berlinale, setzt mit Studierenden Medienprojekte um, informiert Politiker und veranstaltet zusammen mit Projektpartnern die Volkshochschul-Reihe „klimafit" – ein Kurs für alle, die wissen wollen, was uns in Sachen Klima zukünftig erwartet.

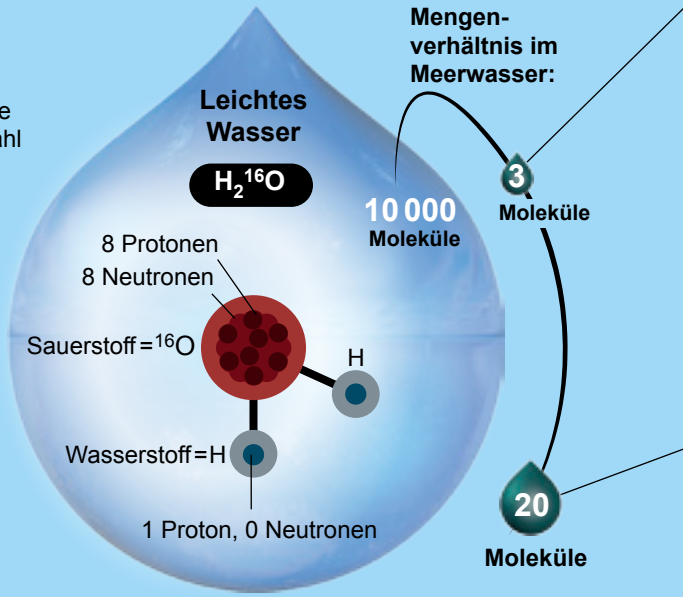
Wasserisotope

Einblicke in das Klima der Vergangenheit

Unserer Erde die Geheimnisse ihrer Klimageschichte zu entlocken, gehört zu den schwierigsten Aufgaben der Forschung. Verlässliche Thermometer gibt es nämlich erst seit rund 300 Jahren. AWI-Forscher nutzen deshalb Wasserisotope als Klimaanzeiger. Ihr Vorkommen erlaubt Rückschlüsse auf Temperatur, Niederschlag und Eisvolumen für viele Millionen Jahre.

Was sind Wasserisotope?

Als Wasserisotope bezeichnet man Moleküle des Wassers, deren Atome die gleiche Anzahl an Protonen, aber eine unterschiedliche Anzahl an Neutronen besitzen. Klimaforscher messen u. a. die Menge derjenigen Wasserisotope, welche im Vergleich zum normalen „leichten“ Wasserisotop ($H_2{}^{16}O$) entweder zwei Extra-Neutronen im Kern des Sauerstoffatoms ($H_2{}^{18}O$) oder ein weiteres Neutron im Wasserstoffatom ($HD^{16}O$) aufweisen. Diese beiden „schweren“ Wasserisotope kommen in der Natur jedoch nur sehr selten vor.



Niederschlag

Schwere Isotope gehen eher in den Niederschlag, mehr leichte Isotope verbleiben im Dampf

Schmelzwasser

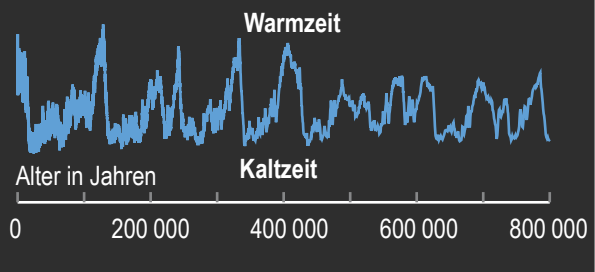
Seen

Wasser versickert

Grundwasser

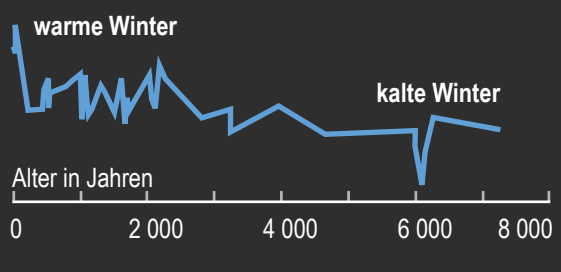
Erkenntnisse aus Eiskernen

Eiskerne bestehen aus Schnee, welcher in der Vergangenheit gefallen ist. Für einzelne Eisschichten bestimmen Forscher aus den Isotopen die Temperaturen und können so z. B. in der Antarktis den Wechsel von Warm- und Kaltzeiten in den letzten 800 000 Jahren erkennen.



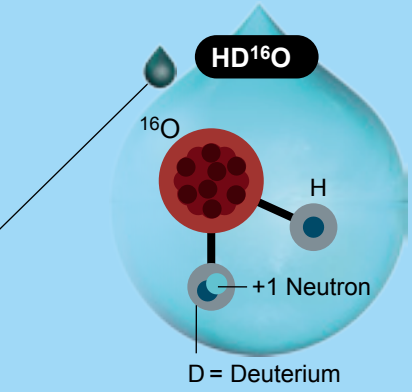
Erkenntnisse aus Bodeneis

Bodeneis bildet sich in Permafrostgebieten z. B. in Form von Eiskeilen. Ihr Eis ist gefrorenes Schneeschmelzwasser. Die Wasserisotope der Eiskeile zeigen daher die Wintertemperaturen zur Zeit ihres Gefrierens - hier eine Temperaturkurve der letzten 8 000 Jahre in Sibirien.

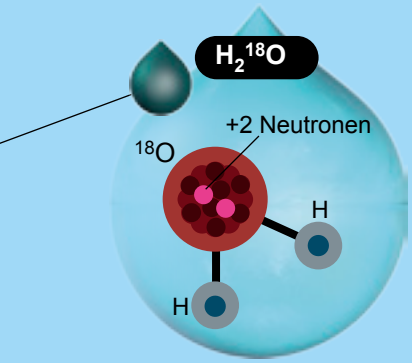


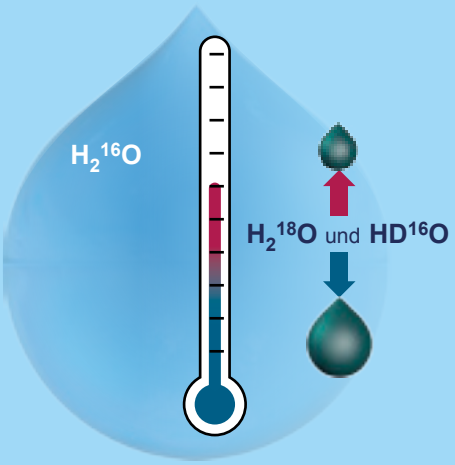
Transport des Wasserdampfes

So misst das Isotopen-Thermometer



Schweres Wasser





Wenn Wasser verdunstet oder kondensiert, verändert sich das Verhältnis der Wasserisotope. So enthält z. B. Niederschlag bei kälteren Temperaturen mehr schwere Wasserisotope als bei wärmeren Temperaturen. Dieser Temperatureffekt bleibt in Klimaarchiven wie Eiskernen erhalten und kann dort auch nach Jahrtausenden nachgewiesen werden.

Wasser verdunstet

Leichte Isotope verdampfen eher, mehr schwere Isotope verbleiben im Ozean

Wasser wird ausgeschwitzt

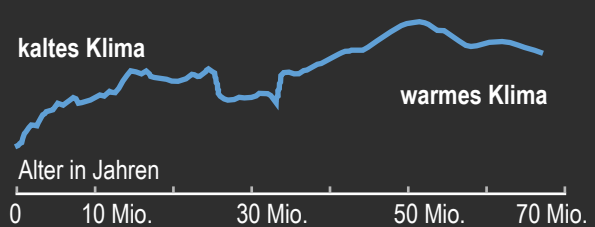
Flüsse

Ozean

Schalenbildende Foraminiferen und Kieselalgen

Erkenntnisse aus dem Meer

Mikrofossilen wie Foraminiferen und Kieselalgen speichern das Isotopensignal in ihren Kalk- und Siliziumschalen. Geoforscher suchen in Ablagerungen am Meeresgrund nach diesen Schalen und können so Wassertemperaturen oder das Eisvolumen der Erde rekonstruieren.



Erkenntnisse aus Modellen

Einige Klimamodelle können nicht nur Temperatur und Niederschlag, sondern auch das Isotopenverhältnis im Niederschlag simulieren. Vergleiche von Modellresultaten und Messungen helfen, die Isotopensignale in Eiskernen, Bodeneis und Meer besser zu verstehen.

EIS WEG **LAND UNTER!**



Der globale Meeresspiegel steigt derzeit um etwa 3,1 Zentimeter pro Jahrzehnt – ein Zuwachs, den vor allem die Bewohner flacher Inseln und Küstenregionen wie hier auf den Philippinen schon deutlich spüren.

Die Antwort auf die Frage, welche Inseln und Küstenregionen der Erde künftig noch bewohnbar sein werden, hängt vor allem davon ab, wie stark die Eismassen Grönlands und der Antarktis weiter abnehmen werden. AWI-Forscher untersuchen deshalb mithilfe von Satelliten, wie es um die Eisschilde steht. Genaue Vorhersagen bleiben dennoch schwierig, denn die Pegelstände steigen nicht überall auf der Welt gleich schnell.

Text: **TIM SCHRÖDER**

In der Fachwelt nennt man sie scherzhaft Tom und Jerry, weil sie ständig hintereinander her sausen, sich am Ende aber doch nie kriegen. Tom und Jerry sind zwei Satelliten, die in 450 Kilometer Höhe permanent die Erde umrunden. Nur 90 Minuten brauchen sie für einen Umlauf. Tom und Jerry wurden im Jahr 2002 ins All geschossen. Sie sind das Herzstück der deutsch-amerikanischen Satellitenmission GRACE, des „Gravity Recovery And Climate Experiment", was man frei mit „Schwerefeld-Messung und Klimaexperiment" übersetzen kann. Wie der Name andeutet, haben Tom und Jerry die Aufgabe, das Schwerefeld der Erde zu vermessen – und zwar Monat für Monat.

Für den AWI-Geophysiker Dr. Ingo Sasgen sind die GRACE-Daten essentiell. Er versucht die Frage zu beantworten, wie es um die großen Eisschilde auf Grönland und in der Antarktis bestellt ist – und vor allem, wie schnell sich diese im Zuge des Klimawandels zurückziehen und den Meeresspiegel steigen lassen werden. „Die Eismassenveränderungen in Grönland und der Antarktis machen sich im Schwerefeld der Erde deutlich bemerkbar", sagt Sasgen. „Schmilzt das Eis, wird das Schwerefeld schwächer. Die GRACE-Messungen verraten uns also, ob und wo die Eisschilde in der Summe wachsen oder schrumpfen." Bekanntlich hat jeder Himmelskörper eine Anziehungskraft, ein Schwerefeld. Dessen Stärke hängt davon ab, wie viel Masse der Himmelskörper besitzt. Anders als bei einer Billardkugel ist die Masse im Erdinnern aber nicht gleichmäßig verteilt. Und auch an der Erdoberfläche werden Massen kurzfristig und kontinuierlich umverteilt – etwa das Meerwasser durch die Gezeiten. All diese Unterschiede können Tom und Jerry messen. Die beiden Satelliten fliegen in einem Abstand von etwa 200 Kilometern hintereinander her und überprüfen mit einem Mikrowellenradar permanent ihren Abstand zueinander. Überfliegt der erste Satellit einen Bereich mit erhöhter Schwerkraft, wird er leicht angezogen und dadurch beschleunigt. Der Abstand zum zweiten vergrößert sich. Diese Abweichung verrät, wie stark die Schwerefeldänderung an dieser Stelle ist. „Trotz des großen Abstands zur Erde misst GRACE sehr genau", sagt Ingo Sasgen. „Wir können sogar erkennen, wie sich →

das Schwerefeld des Amazonasbeckens während der Regenzeit durch das zusätzliche Gewicht des Regenwassers verstärkt."

Grönland verliert mehr Eis als neu hinzukommt

Da ist es kaum verwunderlich, dass auch die Eismassen Grönlands einen deutlichen Schwere-Fingerabdruck haben. Immerhin fallen dort in einem Jahr rund 500 Milliarden Tonnen Schnee. Früher blieb dieser Schnee großflächig liegen, auch in den Randlagen. Er verdichtete sich und ließ die Eispanzer wachsen. „Seit etwa 20 Jahren aber sehen wir einen klaren Trend: Grönland verliert deutlich mehr Eis als durch Schneefall hinzukommt – zuletzt rund 250 Milliarden Tonnen pro Jahr", sagt Ingo Sasgen. Das ist beunruhigend, denn sollte das grönländische Eis komplett abschmelzen, würde der Meeresspiegel weltweit um bis zu sieben Meter steigen.

„Die sieben Meter beziehen sich allerdings auf das Gesamtvolumen des Grönländischen Eisschilds. Etwas Eis war auch während vergangener Warmzeiten in Grönland immer vorhanden. Wir gehen deshalb davon aus, dass künftig nicht die gesamte Masse abschmelzen wird", betont der AWI-Forscher, „Außerdem kann der Anstieg des Meeresspiegels regional ganz unterschiedlich ausfallen." Auch hierzu trägt das Schwerefeld der Erde bei: Gegenwärtig wird das Meerwasser durch das Schwerefeld der großen Eismassen in Grönland und der Antarktis ähnlich wie bei den Mond-Gezeiten angezogen. Sollte das Eis abschmelzen, wird sich die Anziehung verringern, wodurch der Meeresspiegel in beiden Regionen im Vergleich zum globalen Niveau sogar fallen würde. „Solche regionalen Phänomene werden in der Diskussion um den Meeresspiegelanstieg oftmals übersehen", sagt Ingo Sasgen.

Um die heutige Situation besser verstehen zu können, blickt der AWI-Wissenschaftler in der Zeit zurück und untersucht das Entstehen und Vergehen von Gletschern während vergangener Eiszeiten. Er ist auch Spezialist für Landhebungseffekte, ein Phänomen, das durch die Vereisungshistorie der Erde langfristig verursacht wird: „Während der letzten Eiszeit vor etwa 20 000 Jahren war zum Beispiel Nordamerika von einem drei bis vier Kilometer mächtigen Eispanzer bedeckt, dessen Gewicht die Landmasse abgesenkt hat. Allein durch das Abschmelzen dieser Eismassen stieg der Meeresspiegel weltweit im Mittel um rund 80 Meter", sagt Ingo Sasgen. Heute hebt sich Nordamerika um etwa einen Zentimeter pro Jahr, weil die Landmasse durch das Verschwinden des Eisschilds entlastet wurde.

Wassermassen verteilen sich über weite Strecken

Wann, wo und wie schnell sich der Meeresspiegel früher veränderte, können Forscher heute in Sedimentproben ablesen, weil sich in den überfluteten Regionen damals die Lebensgemeinschaften von Süßwasserorganismen zu solchen mit Salzwasserorganismen wandelten. Deren Überreste sind heute noch im Boden zu finden. Das Interessanteste am damaligen Gletscherschwund aber ist: Das Abschmelzen der Eismassen auf der Nordhalbkugel führte vor allem auf der Südhalbkugel zu einem verstärkten Anstieg des Meeresspiegels. „Diese Fernwirkungen hängen unter anderem mit der Veränderung des Schwerefeldes während der Schmelze zusammen", sagt Ingo Sasgen. „Mit dem Abschmelzen der Gletscher nahm die Anziehungskraft Nordamerikas ab. Infolgedessen haben sich die Wassermassen gewissermaßen über große Distanzen in andere Meeresgebiete verteilt." Die Muster dieser Verteilung gleichen daher einem Fingerabdruck – mit dem man die Quellregionen rückblickend identifizieren kann. Ähnliche Phänomene erwartet er auch für den Fall, dass Grönland oder weite Teile der Antarktis zukünftig abschmelzen sollten: Das Abschmelzen Grönlands wird demnach insbesondere auf der Südhalbkugel zum Meeresspiegelanstieg beitragen, der Eisschwund in der Antarktis hingegen eher auf der Nordhalbkugel.

Das Abschmelzen Grönlands wird demnach insbesondere auf der Südhalbkugel zum Meeresspiegelanstieg beitragen, der Eisschwund in der Antarktis hingegen eher auf der Nordhalbkugel.

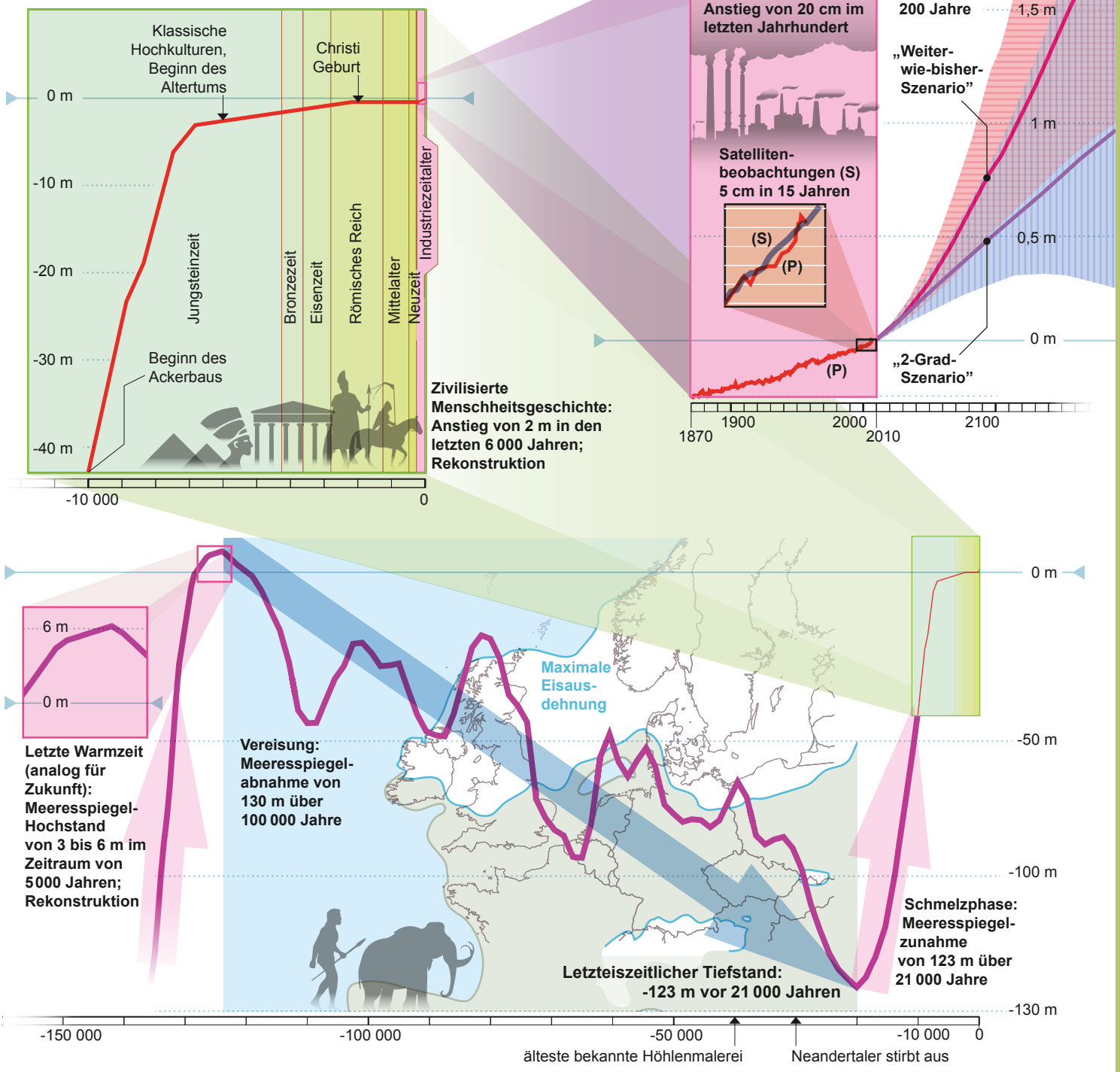
Doch noch ist alle Theorie grau. „Es gibt so viele Faktoren, die den Meeresspiegelanstieg beeinflussen, sodass sichere Vorhersagen noch immer extrem schwer sind", sagt Ingo Sasgen. Sein AWI-Kollege Dr. Klaus Grosfeld pflichtet ihm bei: „Hinzu kommt, dass kleine Veränderungen große Auswirkungen haben können." Ändere sich etwa die Temperatur von Meeresströmungen im Südpolarmeer um nur einige Zehntelgrad, könnte das bereits großflächige Reaktionen der antarktischen Eismassen hervorrufen. Die Fließgeschwindigkeit der Gletscher würde dann infolge schmelzender Schelfeisgebiete zunehmen und mehr Eis aus dem Landesinneren ins Meer transportiert. Das zeigen sowohl Klimamodellierungen als auch Daten aus der Klimavergangenheit. Für die Westantarktis, ein Hotspot →

33,3 PROZENT

des aktuellen Meeresspiegelanstieges sind nicht auf das Schmelzen der Gletscher und Eisschilde zurückzuführen, sondern werden durch die wärmebedingte Ausdehnung des Meerwassers hervorgerufen. Die Ursache: Die Ozeane haben seit dem Jahr 1971 rund 90 Prozent der durch den Treibhauseffekt zusätzlich gespeicherten Wärme aufgenommen – und da sich Wasser wie Quecksilber ausdehnt, wenn es wärmer wird, steigt automatisch der Meeresspiegel.

Das Auf und Ab des Meeresspiegels

Um künftige Pegelstände und ihre Auswirkungen auf die Küstenregionen vorhersagen zu können, untersuchen Klimaforscher die Meeresspiegelentwicklung der Vergangenheit – etwa jene vor rund 130 000 Jahren, als die Erde so warm war, wie es Prognosen für das Ende des 21. Jahrhunderts vorhersagen. Fest steht: Seitdem Menschen sesshaft sind, ist der Meeresspiegel noch nie in so kurzer Zeit so stark angestiegen, wie wir es derzeit erleben.



heutiger Massenverluste, wurde dieser Zusammenhang mit Satellitenbeobachtungen bereits eindeutig belegt.
Ingo Sasgen und Klaus Grosfeld arbeiten deshalb mit Kollegen an leistungsfähigen mathematischen Klimamodellen, die derartige Phänomene stärker einbeziehen als früher. Ihr Ziel ist eine hoch aufgelöste, regionale Vorhersage darüber, wie stark der Meeresspiegel an verschiedenen Küsten tatsächlich steigen wird. Den größten Beitrag wird insgesamt natürlich das Abschmelzen der Gletscher haben. Es ist deshalb besonders wichtig, dieses Abschmelzen möglichst genau abschätzen zu können. Ingo Sasgen verlässt sich deshalb nicht allein auf die Daten von GRACE. Zusätzlich nutzt er zusammen mit AWI-Kollegen aus der Glaziologie Messwerte von ESA-Satelliten wie CryoSat-2, die mit Radarstrahlen die Höhe der Eisbedeckung in hoher Auflösung bestimmen. Sinkt zum Beispiel die Oberfläche des grönländischen Eispanzers deutlich ab, muss dieser Eis eingebüßt haben. Außerdem verwendet der Wissenschaftler Ergebnisse von Rechenmodellen. Diese ermitteln auf Basis meteorologischer Messwerte, wie viel Schnee und Eis sich in den Polargebieten bilden und welcher Anteil schmilzt. „Jede Methode hat ihre Stärken und ihre Schwächen, wir kombinieren daher alle drei", sagt Ingo Sasgen. Und das mit Erfolg!
Als erste Arbeitsgruppe weltweit haben Ingo Sasgen und Kollegen aus anderen Ländern im Jahr 2012 einen Fachartikel veröffentlicht, in dem sie alle drei Methoden für einzelne Regionen Grönlands miteinander verglichen. Das Ergebnis: Die Methoden ergänzen sich gut und sind bestens geeignet, um die Schwächen der jeweils anderen Methoden auszugleichen. GRACE zum Beispiel verrät nur, ob es in der Summe mehr oder weniger Eis gibt. Ob ein starker Eisverlust auf schwache Niederschläge oder einen Warmlufteinbruch aus den Subtropen zurückzuführen ist, erfahren die Wissenschaftler nicht. Zudem muss bei der Analyse der GRACE-Daten ein geologisches Phänomen aus der Vergangenheit berücksichtigt werden: Schwere Gletscher führen zu einem Absinken der Landmassen. Schmilzt das Eis, hebt sich die Landmasse wieder und das noch Hunderte bis Tausende Jahre, nachdem die Eislast verschwunden ist. So wie heute in Nordamerika. Dadurch nimmt das Schwerefeld zu. Aber auch in Grönland und der Antarktis hebt sich großräumig das Land, da die Eisschilde heute deutlich kleiner als während der letzten Eiszeit sind. Dieses Hebungsphänomen muss daher auch bei der Berechnung der Eisschmelze auf Grönland und in der Antarktis berücksichtigt werden.



Schwere Gletscher führen zu einem Absinken der Landmassen. Schmilzt das Eis, hebt sich die Landmasse wieder und das noch Hunderte bis Tausende von Jahren, nachdem die Eislast verschwunden ist.

Ein anderes Problem ergibt sich bei der Analyse der CryoSat-2-Daten: Die Radarsignale dringen je nach Zustand der Eis- und Schneeschichten unterschiedlich tief ein, sodass auch die Höhendaten mit Unsicherheiten behaftet sind. Und die Güte mathematischer Modelle hängt davon ab, mit welchen Daten man sie füttert. „Mit der Kombination aller drei Methoden können wir die Eisbilanz Grönlands und der Antarktis heute deutlich besser analysieren als noch vor wenigen Jahren", sagt Ingo Sasgen.

Ein Nachfolger für GRACE

Doch es geht noch besser: Im Jahr 2018 beginnt ein Projekt des Weltklimaforschungsprogramms, in dem Forscher aus verschiedenen Ländern die GRACE-Messungen sowie die Daten der Radarsatelliten genau analysieren und miteinander vergleichen werden. Sie untersuchen dabei auch, welche Region wieviel zum Meeresspiegelanstieg beiträgt und welche Rolle die Landhebung im Gesamtbudget spielt. Das trifft sich gut, denn im Frühjahr 2018 plant die NASA gemeinsam mit dem Deutschen GeoForschungsZentrum (GFZ) den Start einer GRACE-Nachfolgemission. Das AWI hat sich an den Kosten für die Trägerrakete beteiligt und arbeitet gemeinsam mit dem GFZ an einer Datenoptimierung. Technische Neuerung ist die verbesserte Abstandsmessung zwischen den Satelliten. Durch eine Laserverbindung wird sich das Schwerefeld noch genauer messen lassen.
Das Ziel der beteiligten AWI-Forscher ist klar. Ingo Sasgen und Klaus Grosfeld wünschen sich ein Werkzeug, das alle drei Messverfahren perfekt miteinander kombiniert und mit dem sie in Echtzeit den Zustand des Eises ablesen können. Eine Art Ferndiagnose-Programm für die Polargebiete, das bei Veränderungen die meteorologischen oder klimatischen Ursachen gleich mitliefert. „Dies soll dann auch öffentlich zugänglich sein", sagt Klaus Grosfeld, „Wer will, kann dann jederzeit nachschauen, wie es gerade um die Eismassenbilanz in den Polargebieten steht und welchen Effekt dies auf den Meeresspiegel hat." //

KOMPAKT

- **Die Schwerefelder der Antarktis und Grönlands verändern sich mit der Eismasse, die auf diesen Gebieten lastet. Diese Schwerefeld-Änderung kann von Satelliten präzise vermessen werden.**
- **Das Abschmelzen des grönländischen und des antarktischen Eisschildes wird künftig der wesentliche Treiber des Meeresspiegelanstiegs sein. Jedoch werden die Wasserpegel weltweit sehr unterschiedlich steigen.**
- **Um genaue Vorhersagen treffen zu können, müssen verschiedene Messmethoden kombiniert und in verbesserte mathematische Modelle integriert werden.**



AWI-Glaziologe Dr. Coen Hofstede wird bei seinen Expeditionen auf den Grönländischen Eisschild immer wieder Zeuge der Veränderungen. Im Sommer zum Beispiel schmilzt die Oberfläche des Eispanzers so großflächig, dass das Schmelzwasser reißende Bäche formt, über die es dann Richtung Meer davonströmt.

IMPRESSUM

Herausgeber:

Fachbereich Klimawissenschaften
Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung
Am Handelshafen 12
27570 Bremerhaven

Tel.: +49 (0)471 4831-0
Fax: +49 (0)471 4831-1149
E-Mail: info@awi.de
www.awi.de

Klimabüro für Polargebiete und Meeresspiegelanstieg
Bussestraße 24
27570 Bremerhaven
E-Mail: info@klimabuero-polarmeere.de
www.klimabuero-polarmeere.de

Chefredaktion
Sina Löschke, Renate Treffeisen

Autoren
Sebastian Grote, Sina Löschke,
Tim Schröder, Renate Treffeisen

Bildredaktion
Sina Löschke

Design und Layout
Tanja Deutschländer

Infografik
Martin Künsting

Wissenschaftliche Beratung
Klaus Grosfeld, Torsten Kanzow

Redaktioneller Stand
Januar 2018

doi:10.2312/awi-fokus-klima2018

Druck
Müller Ditzen AG
Bremerhaven

Die Broschüre wurde klimaneutral gedruckt auf FSC®-zertifiziertem Recyclingpapier der Firma Igepa, welches zu 100 Prozent aus Altpapier hergestellt wurde. Für den Druck wurden ausschließlich mineralölfreie Farben verwendet.

BILDNACHWEIS

Titel: Thomas Ronge

Seite 2-3: Mario Hoppmann

Inhaltsverzeichnis: S. 4 o. l.: Thomas Steuer ; o. r.: Thomas Ronge m. l.: Tore Hattermann; m. r.: Tanja Deutschländer (Illustration); u.: Stefan Hendricks; S. 5 o. l.: Stefan Hendricks; o. r.: Alfred-Wegener-Institut / Martin Künsting CC-BY 4.0

Einleitung: S. 7: iStock.com / Osuleo / bearbeitet vom Tanja Deutschländer

Hotspot Arktis: S. 8-9: René Bürgi; S. 10-11. Jaroslav Obu; S. 12-13, m.: René Bürgi, S. 13, r. Alberto Giuliani; S. 14-15: Alfred-Wegener-Institut / Martin Künsting CC-BY 4.0; S. 16-17, l: Alfred-Wegener-Institut / Martin Künsting CC-BY 4.0; m. Volker Rachold

E-Mails vom Filchner-Schelfeis: S. 18-19: Tore Hattermann; Karte: Martin Künsting; S. 20: Tore Hattermann; S. 21, o.: Tore Hattermann; m.: Johannes Lohse; u.: privat; S. 22-23: Alfred-Wegener-Institut / Martin Künsting CC-BY 4.0; S. 24-25, l.: Johannes Lohse; m.: Tore Hattermann; r.: Natalie Prinz

Wenn zwei sich „streiten“: S. 26: Kerstin Rolfes

Stets die richtige Maschenweite: S. 28: Martin Künsting (Erdkugel); S. 28-31: Tanja Deutschländer (Illustration)

Der Sound des Ozeans: S. 32-33, l.: Dr. Helena Feindt-Herr / ITAW; r.: Sebastian Grote; S. 34-35, l.: Alfred-Wegener-Institut; r. o. Jan van Franeker; r. m.: Kerstin Rolfes

Der Wärme-Pulsschlag des Nordatlantiks: S. 36, o.: Sebastian Menze; u.: Kerstin Rolfes; S. 37: Martin Schiller; S. 38: Sebastian Menze; S. 39 o.: Alfred-Wegener-Institut / Martin Künsting CC-BY 4.0; m.: Claudia Wekerle; u.: Medieningenieure Bremen / Sabine Lüdeling; S. 40: Axel Behrendt; S. 41: Frank Rödel

Wohin wandert der Rieseneisberg vom Larsen C-Schelfeis?
S. 42: Thomas Ronge; S. 43: Kerstin Rolfes; S. 45: Tanja Deutschländer / Thomas Rackow

Per Anhalter in die Arktis: S. 46-47: René Bürgi; Martin Künsting (Karten); S. 48, l.: Siegrid Debatin privat; o.: NASA/Goddard Space Flight Center; S. 49: René Bürgi; S. 50-51: beide René Bürgi

Die Stärken des Rechnens: S. 52-53: Tanja Deutschländer (Illustrationen)

Die Lücken im Blick: S. 54-55: Enthält Material © (2014) Planet Labs. Alle Rechte vorbehalten; S. 56, l.: Landsat 8, USGS 2016; S. 57 v.l. ASAR / Envisat, ESA, 2009; PALSAR / ALOS, Jaxa, 2009; AATSR / Envisat, ESA, 2009; Alfred-Wegener-Institut (Analysebild)

Die Ozon-Story: S. 58: Stefan Christmann; S. 59: Jan Pauls; S. 60: Alfred-Wegener-Institut; S. 61: Jessica Helmschmidt; S. 60-61, u.: Tanja Deutschländer (Grafik); S. 62: Markus Rex; S. 63: Brian Leen

Messungen aus der Vogelperspektive: S. 64-65; AWI-IceCam; S. 66-68: alle Aufnahmen Esther Horvath; S. 69: Alfred-Wegener-Institut / Martin Künsting CC-BY 4.0 (Grafik); S. 70: Ester Horvath; S. 71: Tim Schröder

Den Klimawandel vor der Haustür verstehen: S. 72, o. v. l.:Torsten Sachs / GFZ; Achim Brauer / GFZ: Paolo Verzone; M. v. l: André Künzelmann / UFZ; Mario Hoppmann; Thomas Ronge; u.: beide André Künzelmann / UFZ; S. 73: Kerstin Rolfes, S. 74, o.: Ernst Fesseler; 2. R. v. l.: Ernst Fesseler; Focke Strangmann; 3. R. v. l.: Susanna Mohr / KIT; Ernst Fesseler; u.: Ernst Fesseler; S. 75: Ulrike Christiansen, S. 76: Kerstin Rolfes; S. 77, o.: Familie Redlich; M. v. l.: Bärbel Kosanka; Marietta Weigelt; u.: Marietta Weigelt

Einblicke in das Klima der Vergangenheit: S. 78-79: Alfred-Wegener-Institut / Martin Künsting CC-BY 4.0

Eis weg, Land unter: S. 80: iStock.com/WhitcombeRD; S. 83: Alfred-Wegener-Institut / Martin Künsting CC-BY 4.0; S. 85: Coen Hofstede

Seite 87: Mario Hoppmann





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

BREMERHAVEN

Am Handelshafen 12
27570 Bremerhaven
Telefon 0471 4831-0
Telefax 0471 4831-1149
www.awi.de

HELMHOLTZ