

## Mitteilungen

### Wie fossile Moleküle helfen können, Klimamodelle zu verbessern\*

von Juliane Müller<sup>1</sup>

#### VON MEEREIS, WETTER UND KLIMA

Das markanteste Merkmal des Arktischen Ozeans ist seine Eisbedeckung – noch. Seit 1979, dem Start der Meereisbeobachtung durch Satelliten, wurde eine Verringerung der Ausdehnung des Sommermeereises um 12 Prozent pro Jahrzehnt gemessen (NSIDC 2011). Das entspricht einem Verlust von insgesamt etwa drei Millionen Quadratkilometern – zum Vergleich: Der indische Subkontinent nimmt eine Fläche von 3,3 Millionen Quadratkilometern ein. Schließlich wurde der fortschreitende Eisrückzug von einer deutlichen Zunahme des wissenschaftlichen und auch des öffentlichen Interesses an der arktischen Meereisbedeckung begleitet. Und so gewann neben den Diskussionen über die Zukunft indigener Bevölkerungsgruppen (zum Beispiel der Inuit), dem Schicksal von Eisbären oder Fischpopulationen oder der neuen Verfügbarkeit von Bodenschätzen, Energierohstoffen und Schifffahrtsrouten in den hohen Breiten auch die Bedeutung des Meereises selbst an Aufmerksamkeit (SOLOMON et al. 2007).

Denn das arktische Meereis ist nicht nur anfällig für Klimaschwankungen. Durch seine Wechselwirkungen mit der Atmosphäre und dem Ozean und auch durch seine Funktion als Puffer zwischen diesen beiden Elementen beeinflusst das Eis den globalen Wärmehaushalt. Wie eine effektive Dämmschicht reduziert das Meereis den Austausch von Wärme und Feuchtigkeit zwischen dem Ozean und der Atmosphäre. Dies wiederum beeinflusst die Intensität und Ausrichtung von atmosphärischen Zirkulationsmustern, ist also maßgebend für überregionale Wetterlagen. Des Weiteren kontrolliert das Eis das Wärmebudget der Ozeane durch sein Vermögen, die Sonneneinstrahlung zu reflektieren (Albedo), wodurch die Erwärmung der oberen Wasserschichten vermindert wird. Schließlich stellt das Eis ein enormes Süßwasserreservoir dar, das auf den Salzgehalt und die Dichtestruktur des Meerwassers und somit auf globale Meeresströmungen einwirkt. Während der „Großen Salzanomalie“ in den 1970er-Jahren führte beispielsweise ein ungewöhnlich hoher Export von Meereis aus dem Arktischen Ozean in den Nordatlantik zur Bildung einer Süßwasserlinse von geringerer Dichte, was eine Abschwächung des Golfstroms und somit eine Abküh-

lung des Nordatlantiks und Europas bewirkte (DICKSON et al. 1988). Die unterschiedlichen Temperatur- und Salzgehalte der Wassermassen, die im europäischen Nordmeer zwischen Grönland, Island und Skandinavien aufeinandertreffen, stellen also einen der wichtigsten Antriebsmechanismen für die europäische Wärmepumpe, den Golfstrom, dar. Hier, im nördlichsten Bereich des Atlantiks, spielt die Framstraße, die einzige Tiefwasser Verbindung zwischen dem Arktischen Ozean und den restlichen Weltmeeren, eine besondere Rolle im Klimageschehen. Bereits der norwegische Polarforscher Fridtjof Nansen bewies mit seiner Fram-Expedition (1893–1896), dass der Großteil des arktischen Meereises (ca. 3000 km<sup>3</sup> y<sup>-1</sup>) durch diese schmale Passage nach Süden in den Nordatlantik transportiert wird. Gleichzeitig beherrscht ein Ausläufer des Golfstroms den östlichen Bereich der Framstraße vor Spitzbergen und befördert warmes Atlantikwasser nach Norden bis in den Arktischen Ozean hinein. Dieses Wechselspiel von Warmwasserimport und Kaltwasser- bzw. Meereisexport hält das globale Förderband von kalten und warmen Meeresströmungen in Schwung, indem es die thermohaline Konvektion im Nordatlantik antreibt – in diesem Zusammenhang spricht man auch von der atlantischen meridionalen Zirkulation: Das warme Atlantikwasser kühlt auf seinem Weg nach Norden entlang der skandinavischen Küste bis nach Spitzbergen, wo es auf kaltes Wasser und Meereis trifft, kontinuierlich ab. Durch diese Abkühlung und die Erhöhung des Salzgehalts während der Eisbildung nimmt die Dichte des Oberflächenwassers zu, und es sinkt in tiefere Bereiche des Ozeans hinab, wo es schließlich als Nordatlanti-

\* Wettbewerbsbeitrag der Autorin zur Teilnahme am Deutschen Studienpreis für die wichtigsten Dissertationen des Jahres 2012 der Körber-Stiftung.

Der vorliegende Beitrag wurde beim Deutschen Studienpreis 2012 mit einem 2. Preis in der Sektion Naturwissenschaften ausgezeichnet. Er beruht auf der 2011 von Dr. Juliane Müller an der Universität Bremen eingereichten Dissertation „Last Glacial to Holocene variability in the sea-ice distribution in Fram Strait/Arctic Gateway: A novel biomarker approach“.

<sup>1</sup> Alfred Wegener Institute for Polar and Marine Research, Am Alten Hafen 26, D-27568 Bremerhaven, Germany; <juliane.mueller@awi.de>



**Abb. 1:** Bundestagspräsident Dr. Norbert Lammert überreicht die Urkunde für einen 2. Preis beim Deutschen Studienpreis 2012 der Körber-Stiftung an Dr. Juliane Müller. Der Festakt fand am 6. November 2012 im Kaisersaal der Deutschen Parlamentarischen Gesellschaft in Berlin statt. Foto: Körber-Stiftung/David Ausserhofer.

sches Tiefenwasser zurück nach Süden in Richtung Antarktis strömt. Diese enorme Umwälzung von Wassermassen im europäischen Nordmeer wirkt wie ein riesiger Pumpmechanismus, der den Golfstrom in Gang hält.

## SCHWINDENDES ARKTISCHES MEEREIS UND EUROPAS WÄRMEPUMPE

Inwieweit die Stärke des Golfstroms, der Nordeuropa ein für diese Breiten ungewöhnlich mildes Klima beschert, von Veränderungen in diesem Konvektionsprozess beeinträchtigt wird, ist bereits Thema vieler Klimastudien. Momentan wird ein durch die zunehmende Erwärmung beschleunigtes Aussüßen des Arktischen Ozeans durch höhere Niederschläge, eine höhere Zufuhr von Süßwasser aus den Flüssen der Anrainerstaaten und insbesondere durch den sich selbst verstärkenden Prozess des Schmelzens von Meereis beobachtet. Dieses Aussüßen wird das empfindliche Gleichgewicht der unterschiedlichen Wassermassen im Nordatlantik stören. Eine damit verbundene Verminderung der thermohalinen Konvektion beziehungsweise des Pumpmechanismus hätte eine Abschwächung des Golfstroms zur Folge (PELTIER et al. 2006). Darüber hinaus resultiert eine Abnahme der Eisbedeckung nachweislich in einer Destabilisierung der Luftdruckverhältnisse in der Arktis, was zu häufigeren und stärkeren Stürmen im arktischen und atlantischen Sektor führt (JAISER et al. 2012).

Das Verhalten des arktischen Meereises spielt demnach eine bisher eher vernachlässigte, allerdings überaus wichtige Rolle für die Abschätzung der Folgen des Klimawandels. Bedauerlicherweise unterschätzen Computermodelle die Geschwindigkeit des Eisrückgangs im Arktischen Ozean um mehrere Jahrzehnte (STROEVE et al. 2007). Mithilfe eben jener Computermodelle sollen jedoch Klimaszenarien simuliert werden, die wertvolle Informationen über künftige atmosphärische und ozeanische Zirkulationsmuster liefern könnten; Informationen über Veränderungen der Temperatur- und Niederschlagswerte, Sturmintensitäten und -häufigkeiten. Wo genau wird es zu ausgedehnten Dürreperioden oder wo wird es wiederholt zu Überschwemmungen kommen? Die begrenzte Fähigkeit dieser Modelle, die genaue Meereisentwicklung und das resultierende Verhalten von Ozeanströmungen und Luftmassenbewegungen vorherzusagen, stellt demnach ein gravierendes Defizit in der Klima(folgen)forschung dar.

Um nun die Vorhersagefähigkeit von Klimamodellen zu verbessern, hilft der Blick in die Vergangenheit. Können die Modelle die Meereisbedeckung früherer Zeiträume zuverlässig reproduzieren, verbessert dies auch die Prognosen über kommende Meereisschwankungen? Eine Kontrolle solcher Paläomodellierungen erfolgt durch Klima- oder Proxydaten, wie sie zum Beispiel aus Sedimentkernen gewonnen werden. Unter einem Proxy (englisch: Stellvertreter) wird in der Klimaforschung ein Anzeiger verstanden, der Informationen über frühere Umweltbedingungen liefert. So können Pollen oder Baumringe Aufschluss über Niederschlags- und Temperaturverhältnisse an Land geben, während die Isotopenverteilungen in den fossilen Kalkschalen von marinen Einzellern die Temperatur und den Salzgehalt des Meerwassers reflektieren. Solche auf Proxydaten basierenden Studien über längst vergangene (präindustrielle) Umweltbedingungen in der

Arktis helfen also einerseits, die natürliche Variabilität des Klimas abzuschätzen; andererseits dienen sie als Datengrundlage für computergestützte Simulationen jener Prozesse, die solche natürlichen Schwankungen auslösen beziehungsweise begleiten.

Die gezielte Paläorekonstruktion über ein Vorhandensein oder Fehlen von Eis in einer bestimmten Meeresregion gestaltet sich aufgrund der Natur des Eises jedoch als äußerst schwierig. Während das Kommen und Gehen von Gletschern anhand eindeutiger Signaturen im Gestein (z.B. Gletscherschrammen) leicht erfasst werden kann, hinterlässt das Gefrieren oder Schmelzen von Meerwasser bzw. Meereis faktisch keine Spuren. Und so konnte die Frage, ob, wann, oder gar wie lange Teile der Arktis mit Meereis bedeckt waren, bisher nur indirekt beantwortet werden.

## DER MOLEKULARE FINGERABDRUCK VON EISALGEN

Ein vielversprechender Ansatz, wie eine Paläoeisbedeckung eindeutig nachgewiesen werden kann, wurde im Jahr 2007 von der Arbeitsgruppe um Simon T. Belt und Guillaume Massé an der Universität Plymouth (England) vorgestellt (BELT et al. 2007). Ein neuer Proxy, ein hoch verzweigtes Isoprenoidmolekül, das ausschließlich von im Meereis lebenden Diatomeen (Kieselalgen) produziert wird, sollte als Eisanzeiger fungieren. Solche Moleküle, die spezifisch für den Organismus sind, der sie synthetisiert, werden auch Biomarker genannt. Dieser Biomarker für Meereisalgen war neu und wurde kurzerhand IP<sub>25</sub> getauft (für „Ice Proxy“ mit 25 Kohlenstoffatomen). Mittels organisch-geochemischer Analysen identifizierten Simon T. Belt und seine Kollegen den Eismarker IP<sub>25</sub> in Meer eisproben und in marinen Oberflächensedimenten des saisonal bis permanent mit Meereis bedeckten kanadisch-arktischen Archipels und schlussfolgerten, dass mit dem Nachweis dieses Biomarkers in marinen Sedimenten eine vorangegangene Meereisbedeckung belegt werden könne.

Nach der Blüte der Eisalgen im Frühling und mit der einsetzenden Eisschmelze im Sommer sinken die Überreste der Algen inklusive IP<sub>25</sub> auf den Meeresboden, wo sie im Sediment abgelagert werden. Anders als das empfindliche Kieselgehäuse der Algen, das anfällig für Korrosion ist, sind die organischen Lipide, zu denen IP<sub>25</sub> gehört, recht stabil und über Jahrtausende im Sediment konservierbar – man nennt Biomarker daher auch geochemische oder molekulare Fossilien. Während das Vorhandensein von IP<sub>25</sub> in entsprechend alten Sedimenten eine Paläoeisbedeckung anzeigt, kann das Fehlen des Biomarkers jedoch unterschiedliche Gründe haben. Entweder fehlte das Meereis, oder aber die Eisdecke war ungewöhnlich dick und kompakt. Unter einer permanenten, auch im Sommer nicht schmelzenden und mehrere Meter dicken Eisschicht verschlechtern sich die Lebensbedingungen für die sonst gut angepassten Eisalgen extrem. Es kann nicht genügend Licht durch das Eis dringen, um das Wachstum der Einzeller anzuregen. So bleibt die Frühjahrsblüte der Eisalgen aus, und es gelangt kein IP<sub>25</sub> in das darunterliegende Sediment. Diese Ambivalenz stellt einen grundlegenden Schwachpunkt in der Anwendung des neuen Eismarkers dar.

Im Rahmen einer Untersuchung der wechselnden Klima- und

Umweltbedingungen in der Framstraße während der letzten 30.000 Jahre (MÜLLER 2011) fand sich schließlich die Lösung des Problems: Statt sich nur auf den einen Biomarker IP<sub>25</sub> zu konzentrieren, hilft die Berücksichtigung anderer molekularer Hinterlassenschaften im Sediment. Marines Phytoplankton (hierzu gehören beispielsweise Braun- oder Grünalgen, Dinoflagellaten oder Diatomeen) gedeiht vorzugsweise im offenen, eisfreien Wasser. Während der Metabolismus der im Meereis lebenden Eisalgen (Eisdiatomeen) auf eine reduzierte Lichtverfügbarkeit eingestellt ist, reagiert das Phytoplankton äußerst empfindlich auf den Lichtmangel unterhalb des Meereises. Ähnlich dem für Eisalgen charakteristischen Molekül IP<sub>25</sub> gibt es auch spezielle Biomarker, die von den Organismen des Phytoplanktons synthetisiert werden. Hierzu gehören bestimmte Sterole (Brassicasterol, Dinosterol) oder einfache, kurzkettige n-Alkane, die ebenso wie IP<sub>25</sub> nach dem Absterben und der Zersetzung des organischen Materials im Meeresboden „gespeichert“ werden. Die Verknüpfung dieser beiden Biomarkertypen, von denen der eine als Eisanzeiger (IP<sub>25</sub>) und der andere als Anzeiger für eisfreie Bedingungen (Phytoplanktonbiomarker) fungiert, sollte demnach eine eindeutige Unterscheidung zwischen dem Fehlen von Meereis (kein IP<sub>25</sub>, aber viele Phytoplanktonbiomarker im Sediment) und dem Vorhandensein einer permanenten, mehrere Meter dicken Eisschicht (weder IP<sub>25</sub> noch Phytoplanktonbiomarker im Sediment nachweisbar) ermöglichen. Um die Anwendbarkeit dieser Methode zu prüfen, folgte ein „Feldversuch“.

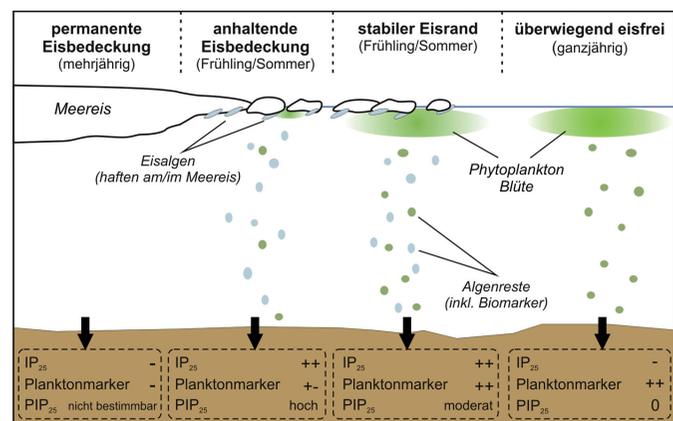
#### EIN ABBILD DER MODERNEN VERBREITUNG VON MEEREIS IN DER FRAMSTRASSE

Es wurde eine Vielzahl von Oberflächensedimenten aus verschiedenen Gebieten der Framstraße hinsichtlich ihres Inventars an Biomarkern untersucht (MÜLLER et al. 2011). Im Bereich der marinen Geologie repräsentieren Oberflächensedimente – das sind die obersten Zentimeter des Meeresbodens – eine Momentaufnahme der jüngsten Umwelt- beziehungsweise Klimabedingungen eines Untersuchungsgebietes. Da die Meereisbedeckung in der Framstraße aufgrund der Zufuhr von warmem Atlantikwasser einerseits und dem Export polaren Wassers und Meereises andererseits höchst variabel ist, stellt dieses Gebiet ein ideales „Testgelände“ für die Überprüfung des neuen Biomarkeransatzes dar. Wie Satellitenaufnahmen zeigen, ist das Vorkommen von Meereis im Osten der Framstraße auf die küstennahen Gebiete vor Spitzbergen begrenzt, während der breite kontinentale Schelf von Ostgrönland beinahe das ganze Jahr über mit Meereis bedeckt ist. Der Großteil des arktischen Packeises, das entlang der grönländischen Küste nach Süden in den Atlantik treibt, schmilzt jedoch, bevor es das Irminger Meer vor der Südostküste Grönlands erreicht, so dass dieses Gebiet bereits im Frühling eisfrei ist. Würde das Vorkommen von IP<sub>25</sub> und der Phytoplanktonbiomarker in den Sedimentproben der unterschiedlichen Gebiete diese Verbreitung des Meereises auch widerspiegeln?

In den Proben aus dem Irminger Meer und aus den Gebieten vor Spitzbergen, wo es kein oder nur wenig Meereis gibt, fehlt IP<sub>25</sub> oder ist in nur sehr geringen Konzentrationen vorhanden, während die Phytoplanktonbiomarker stark angereichert sind. Vor der Küste Grönlands, die bis in den Sommer hinein mit Eis bedeckt ist, verhält es sich genau andersherum: Viel IP<sub>25</sub>

und nur wenige Phytoplanktonbiomarker sind im Sediment konserviert. Dieser Befund passte hervorragend in das Konzept und ließ vermuten, dass der Ansatz, die beiden verschiedenen Biomarker zu kombinieren, sehr gut funktioniert. Rätsel gaben jedoch die gleichzeitig hohen Konzentrationen von IP<sub>25</sub> und Phytoplanktonbiomarkern in den Proben der Dänemarkstraße zwischen Grönland und Island und entlang des äußeren kontinentalen Schelfs von Grönland auf. Wie können sowohl die Konzentrationen des Eismarkers als auch die der Phytoplanktonbiomarker gleichzeitig erhöht sein? Vergleiche mit den Satellitendaten zeigten, dass an genau diesen Stellen die Meer eisbedeckung ihre maximale Frühjahrsausdehnung erreicht – diese Zonen werden auch als Eisrandlagen bezeichnet. Das Wachstum von Phytoplankton wird im Bereich von Eisrandlagen durch die kontinuierliche Freisetzung von Nährstoffen aus dem langsam schmelzenden Eis enorm stimuliert, so dass es regelmäßig zu Phytoplanktonblüten entlang des Eisrandes kommt (SMITH et al. 1987). Dieses Phänomen ist also verantwortlich für die hohen Konzentrationen von Phytoplanktonbiomarkern in den Sedimentproben, die auch reich an IP<sub>25</sub> sind. Für die Paläorekonstruktion von Meereis ist diese Beobachtung von großer Bedeutung, da sie erstmalig eine Möglichkeit bietet, die Position früherer Eisrandlagen zu bestimmen. Auch für die (Paläo-) Klimaforschung sind diese Informationen äußerst wichtig, da es sich hierbei um die Kontaktzone zwischen offenen, mit der Atmosphäre in Austausch stehenden, und eisbedeckten, von der Atmosphäre abgeschirmten Wasserflächen handelt.

Eine rechnerische Verknüpfung der beiden Biomarker zu einem neuen Index erlaubte schließlich auch einen direkten und vor allem quantitativen Vergleich der Meereisverbreitung, wie sie durch die Biomarkerdaten abgebildet wird, mit der wirklichen, von Satelliten erfassten Eisverbreitung im Untersuchungsgebiet. Dieser Index zeigt das Verhältnis von IP<sub>25</sub> zu einem Phytoplanktonbiomarker an; daher auch der frei gewählte Name PIP<sub>25</sub> (für Phytoplankton-IP<sub>25</sub>-Index). Hohe PIP<sub>25</sub>-Werte deuten auf eine hohe Eisbedeckung hin, niedrige Werte verweisen auf eine geringe Eisbedeckung (Abb. 2). Erfreulicherweise korrelieren die PIP<sub>25</sub>-Werte aller Sedimentproben sehr gut mit den aus Satellitendaten berechneten Meereiskonzentrationen für die jeweiligen Positionen der Sedimentproben. Wie hoch die Eisbedeckung einer definierten Fläche ist (je nach Auflösungs-



**Abb. 2:** Schematische Darstellung unterschiedlicher Meereisbedingungen mit entsprechender Produktivität von Phytoplankton und Eisalgen sowie den resultierenden Konzentrationen der Biomarker und PIP<sub>25</sub>-Indizes im Sediment (MÜLLER et al. 2011).

vermögen des Satelliten kann das ein Areal von 6,25 bis zu 25 km<sup>2</sup> sein), wird standardgemäß in Konzentration angegeben: Bei einer Meereiskonzentration von 50 % ist demnach die Hälfte der Fläche eisbedeckt. Dieser direkte Vergleich einer auf Proxydaten basierenden Meereisrekonstruktion mit wirklichen Meereisdaten für die Frühjahrssaison ist der erste dieser Art, und die gute Korrelation belegt, dass der PIP<sub>25</sub>-Index tatsächlich für quantitative Meereisrekonstruktionen genutzt werden kann. Zum Beispiel würde ein PIP<sub>25</sub>-Index von 0,7 einer Meereiskonzentration von 70-80 % entsprechen. Idealerweise könnte man also anhand von PIP<sub>25</sub>-Werten aus Sedimentbohrkernen direkte Aussagen über eine frühere Meereiskonzentration in einem Untersuchungsgebiet ableiten.

Insbesondere, weil die bislang recht vagen Aussagen über ein früheres Vorhandensein oder Fehlen von Meereis nicht in Klimamodelle integriert werden können, stellt dieser neue Ansatz eine grundlegende Innovation für die Klimaforschung dar. Wie stark oder wie schnell veränderte sich beispielsweise die arktische Meereiskonzentration während des letzten Inter-glazials vor etwa 125.000 Jahren, das in vielen Computersimulationen als Äquivalent zu den heutigen Bedingungen und zur Abschätzung des Ausmaßes des globalen Temperaturanstiegs herangezogen wird? Was waren die natürlichen Antriebsmechanismen hierfür? Wie veränderten sich die ozeanisch/atmosphärischen Zirkulationsmuster? Und schließlich: Wie reagierte das globale Klima?

Die Option, aus PIP<sub>25</sub>-Werten abgeleitete Meereiskonzentrationen in Paläoklimamodelle einzulesen, um längst vergangene Klimaschwankungen und daran geknüpfte Ursache-Wirkungs-Prinzipien zu simulieren, würde die Zuverlässigkeit prognostischer Klimamodelle deutlich erhöhen.

## DAMALS WIE HEUTE

Weitere Untersuchungen an langen Sedimentkernen, also an deutlich älterem Probenmaterial, sollten nun Aufschluss über die klimatische Entwicklung in der Framstraße während der letzten 30.000 Jahre geben. Hierbei konnte auch die Anwendbarkeit von IP<sub>25</sub> – der neue Meereisproxy wurde bis zu diesem Zeitpunkt nur in maximal 10.000 Jahre alten Sedimenten nachgewiesen – in Kombination mit Phytoplanktonbiomarkern geprüft werden.

In den letzten 30.000 Jahren wandelte sich das globale Klima erheblich. Während des letzten Glazials, der letzten großen Kälteperiode, waren die Landmassen Nordamerikas und Nordeurasiens mit dicken Eisschilden bedeckt, die sich erst während des Deglazials vor circa 18.000 Jahren zurückzogen und schmolzen. Die Ausdehnung dieser Eisschilde ist anhand von geomorphologischen Strukturen (Moränenlandschaften, Findlinge) recht gut dokumentiert; für die Ausdehnung des Meereises gibt es jedoch nur wenige und oft sogar widersprüchliche Annahmen.

Mit der Untersuchung eines Sedimentkerns vom Yermak-Plateau, einer untermeerischen Hochfläche nordwestlich von Spitzbergen, konnte nun anhand von IP<sub>25</sub> und der Phytoplanktonbiomarker eindeutig rekonstruiert werden, wie variabel die Meereisbedeckung während der letzten 30.000 Jahre war (MÜLLER et al. 2009). Dies erlaubte auch Rückschlüsse auf

die Veränderlichkeit der thermohalinen Zirkulation, also das Verhalten des Golfstroms. Im Zeitraum des „Letzten Glazialen Maximums“ am Ende der Weichselkaltzeit vor 20.000 Jahren zeigt das Fehlen von IP<sub>25</sub> und der Phytoplanktonbiomarker beispielweise an, dass der nördliche Bereich der Framstraße über 6000 Jahre lang mit einer permanenten und sehr dicken Eisdecke überzogen gewesen sein muss; der nördliche Ausläufer des Golfstroms war deutlich geschwächt. Dies steht im krassen Kontrast zu einem abrupten Klimawechsel vor circa 15.000 Jahren, als die Meerenge zu Beginn des Bølling-Interstadials innerhalb weniger Jahrzehnte eisfrei wurde und es auch für mindestens 200 Jahre lang blieb. Der ungewöhnlich schnelle Rückzug des Meereises in der Framstraße wurde von einem rapiden Anstieg der Wassertemperaturen im Nordatlantik begleitet und zeigt, wie eng das Verhalten der Meereisbedeckung mit abrupten Klimaschwankungen verknüpft ist. Dies drückt sich auch in einem weiteren Ereignis vor 13.000 Jahren aus, als eine plötzliche Kaltphase mit einem erneuten Vorstoß des Meereises nach Süden und einer Verringerung der thermohalinen Zirkulation einherging. Für einige Jahrhunderte blieb die nördliche Framstraße, wie bereits während des „Letzten Glazialen Maximums“, von dickem Eis bedeckt.

Was löste diese ständigen Wechsel von Kalt- und Warmphasen aus? Zu den natürlichen Ursachen für die häufigen und oftmals sehr schnell aufeinanderfolgenden Klimaschwankungen gehören Veränderungen in der Intensität der Sonneneinstrahlung, Schwankungen der atmosphärischen Kohlendioxid- und Methankonzentration oder durch den Zerfall großer Eisschilde ausgelöste Süßwasserereignisse, die die ozeanische (und auch atmosphärische) Zirkulation veränderten. Im warmen Holozän, das die letzten 11.000 Jahre umfasst, veränderte sich die Ausdehnung des Meereises in der Framstraße weniger dramatisch als am Ende der letzten Kaltzeit. Mithilfe der IP<sub>25</sub>- und Phytoplanktonbiomarker-Daten eines Sedimentkerns aus der östlichen Framstraße konnte gezeigt werden, dass die Meereisbedeckung in diesem Gebiet über 8000 Jahre hinweg kontinuierlich zugenommen hat. Diese Entwicklung steht im Zusammenhang mit einer stetigen Abnahme der Sonneneinstrahlung auf der Nordhalbkugel und einem verringerten Wärmetransport durch den nordatlantischen Ausläufer des Golfstroms. Interessanterweise korrelieren kurzzeitige Fluktuationen in der Ausdehnung des Meereises vor Spitzbergen mit plötzlichen Gletscherbewegungen auf dem Archipel. Hier wird deutlich, wie schnell sich die Wechselwirkungen zwischen Ozean und Atmosphäre auf die Umwelt auswirken. In den Phasen des Rückzugs von Meereis konnte mehr Feuchtigkeit von der eisfreien Meeresoberfläche an die Atmosphäre abgegeben werden, wodurch die Niederschlagsrate über Spitzbergen erhöht wurde. Der Niederschlag, in Form von Schnee, beschleunigte somit das Wachstum der Gletscher. In den Phasen einer Meereiszunahme wiederum stagnierte das Gletscherwachstum oder nahm sogar ab, weil der für ein Wachstum benötigte Niederschlag fehlte. Zu dieser Zeit blockierte eine ausgedehnte Meereisdecke vor der Küste Spitzbergens den Wärme- und Feuchtigkeitsaustausch zwischen Ozean und Atmosphäre.

Dem langfristigen Abkühlungstrend im Holozän steht der momentan beobachtete, schnell voranschreitende Eisrückgang gegenüber. Die Position, an der der untersuchte Sedimentkern gezogen wurde, ist inzwischen nur noch sehr selten von Meereis bedeckt. Nun gilt das Holozän – das Zeit-

alter der Menschen – in Bezug auf Klimaschwankungen als vergleichsweise stabil, und so stellt sich die Frage, inwieweit die momentane Klimaentwicklung noch im Rahmen natürlicher Schwankungen liegt und wie die ozeanischen und atmosphärischen Rückkopplungsmechanismen aussehen werden.

Um diese Fragen zu beantworten, müssen Computermodelle die klimarelevanten Prozesse sowohl für die Vergangenheit als auch für die Zukunft zuverlässig abbilden können.

## KLIMA IM WANDEL

Viele Paläoklimastudien, die sich nicht nur mit der Entwicklung in der Arktis, sondern auch in anderen Regionen befassen, zeigen, dass der momentan beobachtete Klimawandel kein Einzelfall, kein neues Phänomen ist. Neu ist hingegen, dass der Mensch (unter anderem) durch die Emission von Treibhausgasen zum Klimawandel beiträgt. Noch viel wichtiger aber ist, dass die Welt, anders als vor Jahrtausenden, mittlerweile von sieben Milliarden Menschen bewohnt wird. Der Rückgang des arktischen Meereises mag keine unmittelbare Auswirkung auf Regionen haben, die nicht zu den Anrainerstaaten des Arktischen Ozeans gehören. Die mit dem Eisrückgang verbundenen ozeanischen und atmosphärischen Veränderungen tragen jedoch auch zum überregionalen Klimawandel bei und beeinflussen somit die Ökologie, die Ökonomie und schließlich auch das Migrationsverhalten ganzer Nationen.

Der Schwerpunkt der meisten Klimastudien liegt auf der Simulation der kurz- und auch langfristigen Entwicklung regionaler und globaler Umweltbedingungen (Erwärmungstrends, Niederschläge etc.), um Prognosen abzugeben, die den politischen Entscheidungsträgern als Richtlinien für Handlungsstrategien dienen sollen. Viele Modelle scheitern jedoch schon an der Simulation der heutigen Klimabedingungen – sie können beispielsweise die Entwicklung der arktischen Meereisbedeckung während der letzten 30 Jahre nicht korrekt wiedergeben (STROEVE et al. 2007). Die Notwendigkeit, solche Modelle zu verbessern, liegt auf der Hand. Die richtige Simulation des Verhaltens von Meereis und der physikalischen Wechselwirkungen im Ozean-Atmosphäre-System stellt eine grundlegende Voraussetzung für die Berechnung vertrauenswürdiger Zukunftsprojektionen dar. Der neue PIP<sub>25</sub>-Index bietet erstmals die Möglichkeit, eine Paläoeisbedeckung nicht nur qualitativ, sondern auch quantitativ abzubilden. Computermodelle können mithilfe dieser Daten kalibriert werden, sodass sie „lernen“, nicht nur die komplexen Steuerungsmechanismen der Vergangenheit richtig wiederzugeben, sondern auch die zukünftigen Klimabedingungen realistisch vorherzusagen.

Zuverlässige Prognosen über den Wandel der Eisbedeckung im Arktischen Ozean und die damit einhergehenden Veränderungen der Albedo, der Wassertemperatur und -dichte, der ozeanischen Strömungsmuster, der Verteilung von Hoch- und Tiefdruckgebieten oder der Stabilität des submarinen Permafrosts werden die Planung von Maßnahmen des Klimafolgeschutzes deutlich erleichtern. Dass sich das Klima verändert, wird kaum zu ändern sein. Umso wichtiger ist es, abschätzen zu können, wie es sich verändern wird und wie diesem Wandel begegnet werden kann.

## Literatur

- Belt, S.T., Massé, G., Rowland, S.J., Poulin, M., Michel, C. & LeBlanc, B. (2007): A novel chemical fossil of palaeo sea ice: IP<sub>25</sub>.- *Org. Geochem.* 38: 16-27.
- Dickson, R.R., Meincke, J., Malmberg, S.-A. & Lee, A.J. (1988): The “great salinity anomaly” in the Northern North Atlantic 1968-1982.- *Progress Oceanogr.* 20(2): 103-151.
- Jaiser, R., Dethloff, K., Handorf, D., Rinke, A., Cohen, J. (2012): Impact of sea ice cover changes on the Northern Hemisphere atmospheric winter circulation.- *Tellus A* 64: 11595.
- Müller, J. (2011): Last Glacial to Holocene variability in the sea ice distribution in Fram Strait/Arctic Gateway: A novel biomarker approach.- PhD thesis, University of Bremen.
- Müller, J., Massé, G., Stein, R. & Belt, S.T. (2009): Variability of sea-ice conditions in the Fram Strait over the past 30,000 years.- *Nature Geoscience* 2(11): 772-776.
- Müller, J., Wagner, A., Fahl, K., Stein, R., Prange, M. & Lohmann, G. (2011): Towards quantitative sea ice reconstructions in the northern North Atlantic: A combined biomarker and numerical modelling approach.- *Earth Planet. Sci. Lett.* 306 (3-4): 137-148.
- NSIDC (2011): National Snow and Ice Data Center, Boulder, USA. [http://nsidc.org/news/press/2011004\\_MinimumPR.html](http://nsidc.org/news/press/2011004_MinimumPR.html).
- Peltier, W.R., Vettoretti, G. & Stastna, M. (2006): Atlantic meridional overturning and climate response to Arctic Ocean freshening.- *Geophys. Res. Lett.* 33: L06713.
- Smith, W.O., Jr., Baumann, M.E.M., Wilson, D.L. & Aletsee, L. (1987): Phytoplankton biomass and productivity in the marginal ice zone of the Fram Strait during summer 1984.. *J. Geophys. Res.* 92: 6777-6786.
- Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K.B., Tignor, M. & Miller, H.L. (eds.) (2007): Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on *Climate Change*, Cambridge and New York.
- Stroeve, J., Holland, M.M., Meier, W., Scambos, T. & Serreze, M. (2007): Arctic sea ice decline: Faster than forecast.- *Geophys. Res. Lett.* 34: L09501.