

Klaus Dethloff (MLS), Markus Rex, Uwe Nixdorf, Anja Sommerfeld
und das MOSAiC Team

Das MOSAiC Driftexperiment und arktische Klimaänderungen

Abstract

MOSAiC – The Multidisciplinary drifting Observatory for the Study of Arctic Climate is an international research project under the umbrella of the International Arctic Science Committee (IASC) designed by an international consortium of about 90 polar research institutions from 20 nations. Klaus Dethloff initiated and presented this idea at first time on the IASC conference in January 2009 in Potsdam, resulting in increased international and national support following the observed changes in Arctic sea ice and possible linkages with the climate in mid-latitudes. MOSAiC is spearheaded by Alfred Wegener Institute, Helmholtz Centre for Polar and Marine Research (AWI).

MOSAiC is the largest Arctic expedition ever covering a full annual cycle in the ice from September 2019 to September 2020. It started in September 2019 in Tromsø and is the first year-around expedition into the central Arctic exploring the coupled climate system with a focus on atmosphere-ocean-sea ice-ecosystem and biogeochemical interactions. Since October 2019 Research vessel „Polarstern“ drifts with the sea ice in the central Arctic. The drift started in the Siberian sector of Arctic Ocean and was supported by the Russian ice breaker “Akademik Fedorov” to search for a stable sea ice floe. A distributed regional network of observational sites was established in an area of up to 40 km distance from research vessel „Polarstern“, representing a grid cell of climate models. The ship and the surrounding network will move with the natural sea ice drift across the Polar cap towards the Atlantic.

The rapid climate changes in the Arctic lead to an urgent need for more reliable and accurate data about the state and evolution of the Arctic climate system. This requires accurate observations over various spatial and temporal scales and across a wide variety of disciplines. Observations of many critical and important parameters never were made in the central Arctic for a full annual cycle. The focus of MOSAiC lies on in-situ observations of climate- and weather processes that couple atmosphere, ocean, sea ice, biogeochemistry and ecosystem. These measurements are supported by weather and sea ice predictions and remote sensing and satellite operations to make the expedition successful and includes aircraft operations and cruises by icebreakers from Russian partners.

All observations will be used for the main scientific goals of MOSAiC, enhancing the understanding of the regional and global consequences of Arctic sea ice loss and improve weather prediction models and climate models. The results are needed to advance the data assimilation for numerical weather prediction models, sea ice forecasts and climate models and ground truth for satellite remote sensing. A unique hierarchy of local, regional and global models will be applied, to interpret the MOSAiC measurements and to improve the very poor performance of the models in the Arctic. The understanding of energy budget and fluxes through interfaces, sources, sinks and cycles of chemical species, boundary layer processes, and primary biological productivity is another important topic during the expedition.

1. Die Geschichte der MOSAiC Idee

Am 1. Januar 1992 nahm die neu gegründeten AWI Forschungsstelle Potsdam mit einer gemischten Mannschaft aus Ost- und Westinstituten die Arbeit auf. Ein Ziel bestand darin, die sehr guten aus der Interkosmos- und KAPG Kooperation bestehenden Beziehungen zu russischen Forschungsinstituten in St. Petersburg und Moskau zu bewahren und weiter zu entwickeln. Die erfolgreiche Kooperation zwischen dem Alfred-Wegener-Institut in Potsdam und dem Arktischen und Antarktischen Forschungsinstitut in St. Petersburg im Bereich Atmosphärenforschung hatte ihren ersten Höhepunkt mit der Teilnahme des AWI Mitarbeiters Jürgen Gräser an der russischen Driftstation NP-35 im Rahmen des Internationalen Polarjahres 2007/08. Im April 2006 hatte Klaus Dethloff das AARI St. Petersburg und dessen Direktor Ivan Frolov besucht und die wesentlichen Ideen vorgestellt und diskutiert. Es wurde ein gemeinsames Projekt unter dem Titel „Atmospheric investigations on a drifting station in the Arctic sea (AIDA)“ beschlossen. Die Partner einigten sich auf Untersuchungen zur Kopplung zwischen der arktischen Grenzschicht und der freien Troposphäre durch Radiosondierungen sowie zu stratosphärischen Ozonsondierungen zum besseren Verständnis der Tropo-Stratosphärenkopplung. Nach erfolgreicher Beendigung dieses Projektes im Rahmen des Internationalen Polaren Jahres IPY 2007/08 veranstalteten wir einen gemeinsamen AWI-AARI Workshop in Potsdam zu den wissenschaftlichen Ergebnissen und beantragten, leider erfolglos weitere bilaterale Unterstützung unserer Ideen über Helmholtz-Russian Joint Research Groups. Deshalb internationalisierten wir unsere Aktivitäten noch stärker.

Dazu reichten wir im Dezember 2008 das EU-Projekt TORUS „Toward the reduction of uncertainties in Arctic and global climate projections“ mit der Idee von Messungen auf einer internationalen Driftstation ein. Leider scheiterten wir an dem enttäuschenden mangelnden Interesse der EU an

Forschungen in der europäischen Arktis und der Unfähigkeit des Wissenschaftskommissars der Europäischen Union, frühzeitig gesellschaftsrelevante Forschungsthemen zu erkennen und zu fördern. Der International Arctic Science Committee (IASC) Workshop und die Neustrukturierung mit den Arbeitsgruppen Terrestrisch, Atmosphäre, Kryosphäre, Human- und Sozialwissenschaft, und Marine and Arctic Ocean Sciences Board (AOSB) fand im Januar 2011 in Potsdam statt. Es ging darum, in Anbetracht der beschleunigten arktischen Meereisabnahme, Forschungslücken zu identifizieren und Prioritäten neu zu setzen, sowie eine bessere Vernetzung der IASC Arbeitsgruppen und internationale Kooperation in der Arktis.

Klaus Dethloff schlug als deutsches Mitglied der atmosphärischen IASC Arbeitsgruppe vor, eine internationale Eis-Driftstation über dem arktischen Ozean zu planen und vorzubereiten, um die Prozesse der arktischen Meereisabnahme auf der Basis von Daten und Modellen zu analysieren. An den danach folgenden Diskussionen waren Matthew Shupe vom ERL Boulder und eine große internationale Wissenschaftlercommunity beteiligt. Dabei sprachen wir von einer neuen Arktis mit abschmelzendem Meereis und dem Auftreten neuartiger Prozesse für Wettervorhersagen und Klimaentwicklung. Im September 2011 organisierte das AWI mit Hilfe des damaligen IASC Repräsentanten Volker Rachold den ersten Internationalen Eisdriftworkshop im AWI Potsdam mit 50 internationalen Teilnehmern. Dieser stand noch unter dem Titel „Atmospheric investigations on a Drifting Observatory on the Arctic Sea and regional and global climate model simulations (AIDA-RCM)“. Im Juni 2012 fanden der 2. MOSAiC Workshop im CIRES Boulder und im Mai 2013 der 3. Workshop wieder im AWI Potsdam statt. Hier wurden die Hauptlinien des Wissenschaftsplan für die internationale Driftstation entwickelt. Die Projektidee fand große Unterstützung bei der AWI Direktorin Karin Lochte, dem AWI Forschungsprogrammchef Heinz Miller und dem AWI Logistikchef Uwe Nixdorf, und die Diskussionen mit ihnen führten dazu, dass wir auch die Biogeochemie und Ökosystem-Prozesse in das Projekt integrierten.

Dazu hatten wir ein White Paper verfasst und uns auf den neuen Titel „Multidisciplinary drifting Observatory for the Study of Arctic Climate: A drifting research station to study atmosphere-ocean-sea-ice processes in the central Arctic icepack (MOSAiC)“ geeinigt, um die interdisziplinären Aspekte des Projekts besser sichtbar zu machen. Im August 2014 hatte Klaus Dethloff als Projektleiter zusammen mit Roland Neuber, Annette Rinke, Ulrike Wacker, Christof Luepkes, Marcel Nicolaus, Rüdiger Gerdes, Torsten Kanzow, Ilka Peeken (alle AWI), Andreas Macke (TROPOS), Matthew

Shupe (ERL Boulder), Vladimir Sokolov (AARI), Huygen Yang (PRIC) und dem internationalen MOSAiC Konsortium bei der Deutschen Forschungsgemeinschaft einen Antrag auf Schiffszeit für das Forschungsschiff „Polarstern“ eingereicht.

Der Titel des Antrags lautete „Understanding the coupled climate system of the Arctic through in-situ measurements and modelling during polar night and polar day conditions“. Parallel entwickelten wir in einer internationalen Anstrengung den Wissenschafts- und einen Implementierungsplan. Dabei war besonders Mathew Shupe aktiv, der als Co-Organisator des Projektes auf der amerikanischen Seite auftrat und die Verbindung zur NSF herstellte. Alle Ideen zu MOSAiC wurden unter vertrauensvoller Beteiligung der AARI Kollegen Vladimir Sokolov, Ivan Frolov und Alexander Makarov entwickelt. Unser „Polarstern-Antrag“ mit der Projekt-Nr. N-2014-H-060_Dethloff wurde erfolgreich begutachtet und im Mai 2015 genehmigt.

Bei der Arctic Science Summit Week im April 2013 in Krakow stellte Klaus Dethloff das MOSAiC Projekt erstmals der internationalen Community vor. Nach langen Diskussionen mit den wichtigsten internationalen Partnern brachte dann der MOSAiC Workshop während der Arctic Science Summit Week in Toyama im Frühjahr 2015 den Durchbruch in Bezug auf die internationale Akzeptanz des Projektes. Im Juni 2015 organisierte das AW den internationalen MOSAiC Implementation Workshop in Potsdam mit mehr als 70 Teilnehmern. Dieser fokussierte die wissenschaftlichen Schwerpunkte weiter. Im April 2017 fanden ein MOSAiC Workshop während der IASC Tagung in Prag und im November 2017 ein weiterer Implementation Workshop im AARI St. Petersburg statt. Bei diesen wurden die wissenschaftlichen und die logistischen Details unter der Projektleitung von Markus Rex, der die Koordinierung des MOSAiC Projektes im Dezember 2015 übernommen hatte und Anja Sommerfeld, die seit April 2016 das MOSAiC Koordinierungsbüro leitet, weiter spezifiziert. Wir planten das Driftexperiment anfangs für den Zeitraum 2018–2019. Aus internen AWI Gründen und in Abstimmung mit den involvierten internationalen Partnern musste dieser Zeitraum um ein Jahr auf 2019–2020 verschoben werden, und jetzt befindet sich MOSAiC in der Realisierung.

2. Die MOSAiC Logistikoperation

Die Expedition für das driftende Meereisobservatorium MOSAiC startete am 20. September 2019 aus Tromsø mit Kapitän Stefan Schwarze und Projektleiter Markus Rex. Seit 2011 wurde diese Idee unter dem Schirm von

IASC International Arctic Science Committee verfolgt und wird jetzt trotz der Schwierigkeiten infolge der Coronavirus-Pandemie realisiert. Die Entwicklung der wissenschaftlichen Ideen und der komplizierten Logistik erfolgte durch ein großes internationales Team unter AWI Leitung. Besonders wichtige Beiträge kamen deshalb vom AWI, dem ERL Boulder und dem AARI St. Petersburg. Von Anfang an war auch der Deutsche Wetterdienst (DWD) eingebunden, da derartige komplizierte und risikoreiche Operationen in der Arktis die besten Wetterinformationen und Wettervorhersagen erfordern. MOSAiC ist die größte Forschungsexpedition, die jemals in der Arktis stattfand. Dabei wurde das AWI Flaggschiff, der Forschungseisbrecher „Polarstern“ in der zentralen Arktis an einer Eisscholle angedockt und führte während seiner Transpolardrift Messungen zum gekoppelten Klimasystem durch. Unterstützt wurde dieses Experiment durch das Forschungsschiff „Akademik Fedorov“, das Flaggschiff des AARI St. Petersburg und die logistischen Erfahrungen der russischen Kollegen im Eis des Nordpolarmeeres seit 1937 mit der Nordpoldriftstation NP 1. Die MOSAiC Expedition und der Austausch der Crew und Wissenschaftler sowie Transport von Lebensmitteln und Auftankung der „Polarstern“ wurde durch mehrere ROSMORPORT Eisbrecher und Helikopter MI-8 gewährleistet. MOSAiC ist das Ergebnis einer wirklichen internationalen Zusammenarbeit, geleitet vom AWI mit Beiträgen aus 90 Instituten und 20 Nationen. Insgesamt werden 500 Personen ein Jahr lang unter der MOSAiC Flagge im Eis arbeiten. Die Gesamtkosten betragen 140 Millionen €, die zu großen Teilen durch das BMBF und weitere internationale Forschungsprojekte abgedeckt wurden.

Nach dem Start aus Nordnorwegen wurde am 4. Oktober 2019 die „Polarstern“ an die auf der Basis von Satellitendaten und Erkundungen vor Ort ausgewählte MOSAiC Eisscholle in der nördlichen Laptevsee mit einer Ausdehnung von 2,8x3,8 km bei 136 °E, 85°N angedockt. Ein Teil der Scholle bestand aus nicht einmal ein Jahr altem Packeis, ein anderer Teil aus mehrjährigem bis zu 3–5 m dickerem Eis. Um die Scholle wurde im Radius von ca. 40 km ein Netzwerk von Ozeanbojen ausgebracht (siehe Krumpen et al. 2020). Seit dieser Zeit driftete die MOSAiC Scholle mit der „Polarstern“ in einem vorhergesagten Driftkorridor der Transpolardrift zunächst am Nordpol vorbei und sodann nach Süden in Richtung Spitzbergen und hat einzigartige Messungen zu arktischen Klimaänderungen im gekoppelten System Atmosphäre, Ozean, Meereis, Biogeochemie und Ökosystemen erbracht.

Diese in-situ Messungen zur Wirkungsweise des gekoppelten arktischen Klimasystems auf schnellen zeitlichen und kleinen räumlichen Skalen sind die unerlässliche Grundlage, um subgridskalige Parametrisierungen zahlrei-

cher ungenau bekannter Prozesse in Wettervorhersage- und Klimamodellen in der Arktis zu verbessern. Das Ziel von MOSAiC besteht darin, die wichtigsten arktischen Feedbackprozesse lokal und regional zu vermessen und ihr komplexes Zusammenspiel für globale Änderungen in den Telekonnectionsmustern und Wetterregimen zu verstehen.

Dazu gehören die Rolle von Turbulenz und mesoskaligen Wirbeln im Ozean bei der Meereisschmelze, ihre Verbindung zu mesoskaligen atmosphärischen Strukturen, Feuchtetransporte durch Zyklonen, vertikale Stabilität und Energieflüsse an der Interface zwischen Ozean und Eis, langwellige infrarote Rückstrahlung und tiefe Wolken, Aerosole und Kondensationskeime, vertikale Durchmischung und horizontale Wärmetransporte, Schmelz-, Deformations- und Driftprozesse des arktischen Meereises, Wärme und Kohlendioxidaufnahme des arktischen Ozeans, biologische Phytoplanktonproduktivität, Ozeanversauerung und Nährstofftransporte entlang der Transpolar drift und tropo-stratosphärische Kopplung durch synoptische und planetare Wellen sowie die Rolle stratosphärischen Ozons und chemischer Zyklen der Atmosphäre.

Die MOSAiC Eisscholle driftete vom 4. Oktober 2019 bis 16. Mai 2020 im vorausberechneten Korridor nach Süden. In diesem Zeitfenster erfolgten Austausch der Besatzung und der Wissenschaftlercrews von Leg 1 auf Leg 2 im Dezember 2019 und Leg 2 auf Leg 3 Ende Februar/Anfang März 2020 durch die russischen Eisbrecher „Admiral Makarow“ und „Kapitan Dranitzyn“. Abbildung 1 zeigt die bisherige Driftroute der MOSAiC Eisscholle und der an die Scholle angedockten „Polarstern“ sowie deren Route nach Spitzbergen zum Legaustausch infolge der Corona-Pandemie und zurück ins Eis.

Insbesondere die Anfahrt der „Kapitan Dranitzyn“ an die „Polarstern“ Ende Februar 2020 durch sehr dickes Eis dauerte drei Wochen und wurde durch intensive Eisroutenberatung durch das AARI St. Petersburg überhaupt erst ermöglicht. Der für den April 2020 geplante Legaustausch von Leg 3 zu Leg 4 fiel der Corona-Pandemie zum Opfer, da der internationale Flugverkehr eingestellt wurde und die für diesen Austausch eingeplanten russischen Antonovs von Utair keine Flüge von Spitzbergen zur Landebahn auf der MOSAiC Eisscholle durchführen konnten. Durch die AWI Direktorin Antje Boetius, Logistikchef Uwe Nixdorf und Expeditionsleiter Markus Rex wurde eine alternative Lösung gefunden, die den Transport der Leg 4 Crew von Bremerhaven nach Spitzbergen unter Corona-Bedingungen auf den HGF Schiffen Sonne und Maria S. Merian ermöglichte.

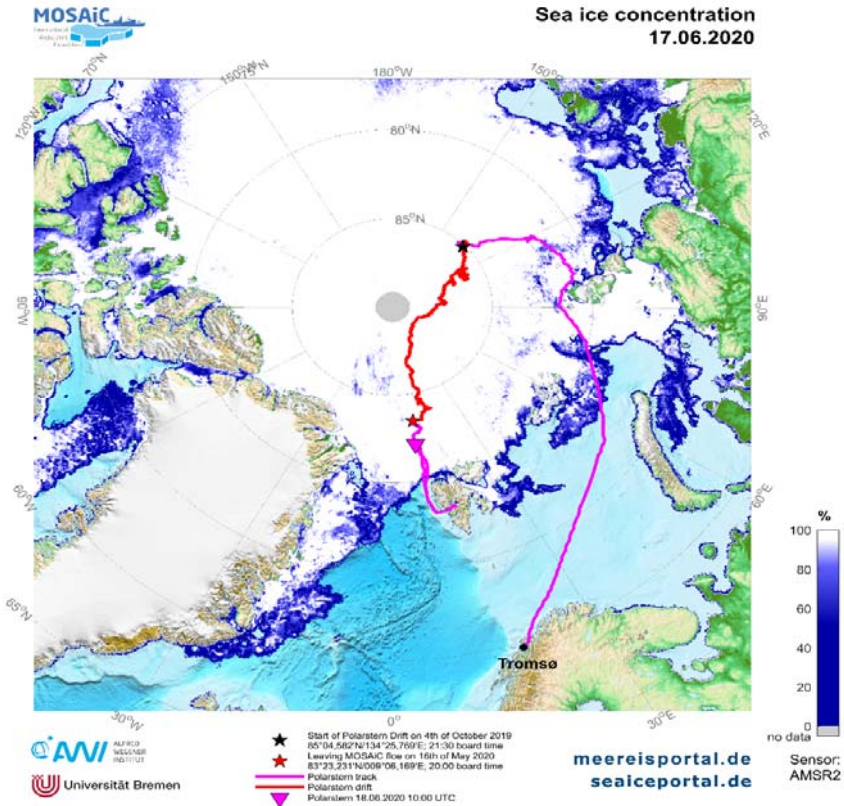


Abb. 1: MOSAiC Drift vom 4. Oktober 2019 bis zum 17.06. 2020

Daten von www.meereisportal.de.

Dazu musste die „Polarstern“ am 4. Mai 2020 für eine gewisse Zeit die MOSAiC Scholle verlassen und sich nach Spitzbergen einschiffen, um dort den Austausch von Leg 3 auf Leg 4 durchzuführen. Seit dem 17. Juni 2020 befindet sich „Polarstern“ wieder an der ursprünglichen MOSAiC Scholle und wird die Messungen bis Anfang Oktober 2020 fortsetzen, um wie geplant einen arktischen Jahreszyklus zu vermessen. Der durch schwedische und chinesische Schiffe geplante Legaustausch von Leg 4, Leg 5 und Leg 6 fiel der Corona-Pandemie zum Opfer und wird durch das AARI St. Petersburg durchgeführt. Dafür gilt unser besonderer Dank AARI Direktor Alexander Makarow und Logistikchef Vladimir Sokolov.

3. Synthese von MOSAiC Messungen und Modellen

Ein wesentliches Ziel des MOSAiC Projektes besteht darin, die einzigartigen Messungen zur Verbesserung der Wettervorhersage- und Klimamodelle zu benutzen. Dazu werden genestete Multiskalenmessungen in den Subsystemen Atmosphäre, Ozean, Meereis, Biogeochemie- und Ökosystem auf der Eisscholle und in dem verteilten ozeanischen Bojennetzwerk durchgeführt und Satellitendaten und Wettervorhersageprodukte zur Einschätzung regionaler und hemisphärischer Zusammenhänge ausgenutzt. Diese Messungen kommen einem Radarbild der Arktis gleich und werden durch eine raum- und zeitskalenabhängige Hierarchie von Wettervorhersage- und gekoppelten Klimamodellen unterstützt. Zur Interpretation der lokalen Messungen werden hochauflösende Turbulenzmodelle wie das LES-ICON verwendet. Mesoskalige und regionale Prozesse können in einer Hierarchie von regionalen atmosphärischen und gekoppelten Klimasystemmodellen der Arktis untersucht werden. Auch das globale ICON Modell des DWD im Vorhersagemodus und im Klimamodus werden benutzt, um ihre Leistungsfähigkeit und Performance in der Arktis anhand der in-situ MOSAiC Messungen zu verbessern. Diese Untersuchungen laufen gerade in BMBF geförderten Nachfolgeprojekten und im DFG geförderten AC3 Transregioprojekt an (siehe Wendisch et al. 2017).

Durch diesen skalenübergreifenden Ansatz des ICON Modellsetups könnten international erstmalig Ergebnisse aus lokalen MOSAiC in-situ Messungen in sub-gridskalige Parametrisierungsansätze im Sinne von Nahtlosigkeit ohne harte Modellsprünge beim Übergang zwischen verschiedenen Modelltypen für die Konvektion in Wolken und stabile Grenzschichtturbulenz münden. Abbildung 2 stellt die Kopplung von experimentellen und modellierenden Untersuchungen zusammen mit Flugzeugmessungen und Satellitenbeobachtungen dar. Die Modellhierarchie umfasst auch operationelle Wettervorhersagemodelle des DWD und im Year of Polar Prediction (YOPP) Projekt das ECMWF Vorhersagemodell. In beiden Modellen werden MOSAiC Daten für ausgewählte Intensive Beobachtungsperioden wie im Februar-März 2020 im Datenassimilationsschema berücksichtigt, um die Verbesserung der Performance der Modelle durch zusätzliche Daten in der Arktis zu untersuchen (siehe Inoue et al. 2015).

Die Motivation für das interdisziplinäre Projekt wurde im *MOSAiC Scienceplan* (2016) beschrieben. Die wichtigste Frage lautet, die Ursachen und Konsequenzen des abnehmenden arktischen Meereises infolge der globalen Erwärmung zu klären. Dazu gehören weitere nachgestellte Fragen, die

in den wichtigsten Subsystemen angesiedelt sind. Wie bewegt, wächst und deformiert sich das arktische Meereis in der Tranmpolardrift? Welche Prozesse bestimmen die Bildung, Eigenschaften und Erhaltung arktischer Wolken und deren Wechselwirkung mit Aerosolen und der Grenzschichtstruktur? Wie bestimmen biologische und chemische Prozesse das arktische Ökosystem und die wesentlichen Elementzyklen im Eis der Arktis? Wie beeinflussen Änderungen im arktischen Eis-Ozean-Atmosphäre System den großskaligen Wärme- und Massenaustausch mit Relevanz für Klima- und Ökosystemänderungen?

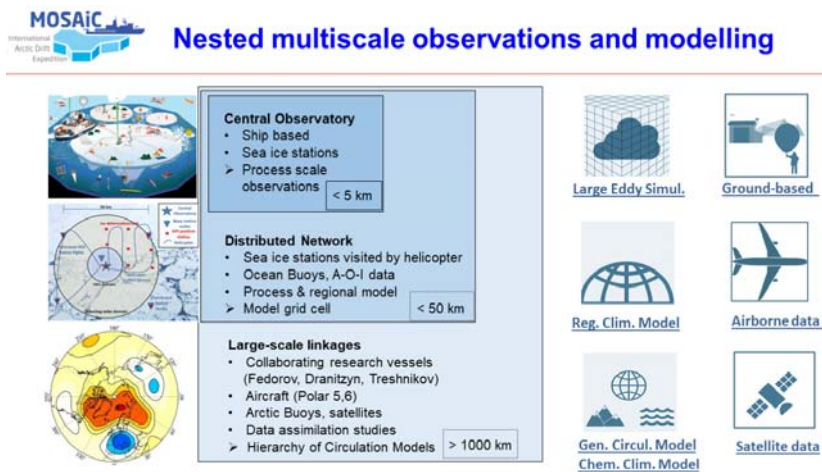


Abb. 2: Hierarchische Struktur der Messungen

Am Zentralen Observatorium um die „Polarstern“, das verteilte Bojennetzwerk und die großskaligen Verbindungen sowie die dazu eingesetzten Modelle, die von hochauflösenden Large-Eddiesimulationsmodellen über regionale ungekoppelte und gekoppelte Modelle zu globalen Modellen reichen.

Der globale Klimawandel manifestiert sich in der Arktis durch verschiedene Rückkopplungsschleifen besonders deutlich und führt zu einer stärkeren Erwärmung in der Arktis im Vergleich zu mittleren Breiten, ein Prozess, der als arktische Verstärkung bezeichnet wird. Die stärkere Erwärmung der Arktis reduziert den meridionalen Temperaturgradienten zwischen den Tropen und der Arktis, wodurch die Wechselwirkung zwischen den planetaren und baroklinen Wellen nachhaltig verändert wird mit wesentlichen Konsequenzen für das Klima und Wetter mittlerer Breiten (siehe Cohen et al. 2014).

Änderungen in individuellen arktischen Feedbacks, wie der vertikalen atmosphärischen und ozeanischen Stabilität, der bodennahen Wärmefflüsse zwischen Eis- Ozean und Atmosphäre, der Bildung tiefer Wolken und deren langwelliger Rückstrahlung, der horizontalen Wärme- und Feuchtefflüsse aus mittleren Breiten in die Arktis, der Wärme- und CO₂ Aufnahme des arktischen Ozeans, seine Rolle bei der Tiefenwasserbildung und der thermohalinen Umwälzfunktion und die barotropen-baroklinen Feedbacks bei der Ausbreitung planetarer Wellen und deren Einfluss auf die Kopplung von Tropo- und Stratosphäre und der stratosphärischen Ozonschicht beeinflussen hemisphärische Wetter- und Klimaprozesse. Die Arktis stellt deshalb eine Schlüsselregion zum Verständnis der Wirkungsweise des nordhemisphärischen Klimasystems dar. Wie beeinflussen regionale Prozesse, die sich durch eine intensive Kopplung im gekoppelten System der Arktis auszeichnen, Änderungen in den dominierenden Wettermustern, Klimaregimen und Telekonnektionsmustern der mittleren Breiten?

Bereits in früheren arktischen Messkampagnen standen ähnliche Fragen im Mittelpunkt der Untersuchungen, wie auf den russischen Driftstationen und während des Internationalen Polarjahres IPY 2007/08 auf NP35 und in vielen weiteren Großprojekten (siehe SHEBA 1997/98 oder N-ICE2015). Aber in keinem dieser Projekte wurde ein koordinierter experimenteller und modellierender Fokus auf das Verständnis der Wirkungsweise des gekoppelten Klimasystems der Arktis gerichtet.

4. Forschungsschwerpunkte im gekoppelten arktischen Klimasystem

Abbildung 3 stellt ein Schema der Kopplung der verschiedenen Subsysteme der Arktis dar und verdeutlicht anschaulich die wirkenden Feedbacks zwischen Prozessen in der Atmosphäre von der Grenzschicht und der Troposphäre bis in die Stratosphäre mit ihrer Ozonschicht. Eine besondere Rolle spielen tiefe arktische Mischphasenwolken, weil sie durch langwellige Rückstrahlung zur Oberflächenerwärmung des arktischen Ozeans und zum Schmelzen des arktischen Meereises beitragen. Im Ozean findet atlantischer Warmwassereinfluss zwischen 300 bis 800 m Tiefe in die Arktis statt, das sich über die Schelfgebiete und die drei arktischen Ozeanbecken verteilt. Zusammen mit dem Süßwassereintrag durch arktische und kanadische Flüsse wird in der Laptevsee Meereis gebildet. Selbst wenn die arktische Luft sich bis auf minus 30 Grad abkühlt, bleibt das Wasser des arktischen Ozeans bei Temperaturen um den Gefrierpunkt und führt durch das Gefrieren zur Bildung von Meereis. Dabei wird das Meersalz nicht in das Eisgitter eingefügt

und trägt zur Erhöhung des Salzgehaltes bei. Dadurch erhöht sich die Dichte des arktischen Wassers. Es wird schwerer, sinkt ab und treibt die thermohaline Umwälzkirkulation des Ozeans an.

Das arktische Meereis integriert die von oben aus der Atmosphäre wie von unten aus dem Ozean wirkenden Prozesse. Die ozeanische Deckschicht bis ca. 100 m Tiefe und die Transpolardrift des arktischen Eises wird zum größten Teil durch atmosphärische Hoch- und Tiefdruckgebiete angetrieben. Gleichzeitig findet zwischen dem atlantischen Wassereinfluss durch die kalte halokline Ozeanschicht vertikale Durchmischung statt, wodurch warmes

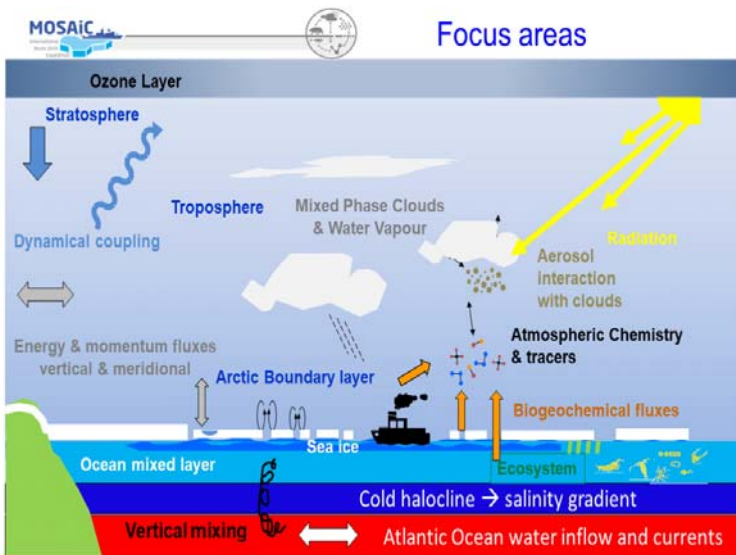


Abb. 3: Schema der Kopplung der verschiedenen Subsysteme der Arktis und ihre wichtigsten Feedbacks

Wasser auf die sibirischen Schelfgebiete gelangt, aber gleichzeitig schweres salzhaltiges Wasser absinkt und als Tiefenwasserströmung die thermohaline Umwälzbewegung des globalen Ozeans antreibt. Die Ozeanströmungen beeinflussen die globale Erwärmung nicht nur durch die Umverteilung von Wärme, sondern auch durch die Aufnahme von CO₂ aus der Atmosphäre. Dadurch steigen die Konzentrationen dieses Treibhausgases in der Atmosphäre langsamer, und die globale Erwärmung wird abgemildert. Wenn sich mehr CO₂ im Meerwasser löst, sinkt dessen Aufnahmekapazität, denn je wärmer der Ozean wird, desto weniger CO₂ kann es aufnehmen.

Durch die Kohlendioxidaufnahme werden weitere chemische und biologische Prozesse im arktischen Ozean verändert, die durch die verbundenen Kreisläufe von Kohlenstoff, Stickstoff und Phosphor das Ökosystem beeinflussen. Die Transpolardrift und die arktischen Ozeanströmungen treiben nicht nur die Bewegungen der Meereismassen an, sondern transportieren und verteilen auch Nährstoffe und die genannten chemischen Elemente in der Nordpolarregion.

Neben chemischen Prozessen steuern auch biologische Reaktionen die CO_2 -Aufnahme im Ozean. In der oberen ozeanischen Deckschicht produzieren mikroskopisch kleine einzellige Algen, das sogenannte Phytoplankton durch Photosynthese aus Kohlendioxid und Sonnenlicht organisches Material, das in tiefere ozeanische Wasserschichten sinkt und dort abgebaut wird. Dieser Prozess wird auch biologische Pumpe genannt, dessen Effizienz durch Ozeanversauerung verringert wird, denn im Wasser wird durch das gelöste CO_2 Kohlensäure gebildet. Das Oberflächenwasser des Ozeans wird stetig saurer. Sein pH-Wert ist seit der Industrialisierung von 8,2 auf 8,1 gesunken, was einem Anstieg des Säuregrads um 26 Prozent entspricht. Mit zunehmender Ozeanversauerung sinkt die Konzentration von Carbonationen. Kalkbildende Organismen wie Muscheln, Korallen oder bestimmte Plankton-Arten benötigen diese Carbonationen, um Schalen und Skelette aufzubauen. Je weniger Carbonationen zur Verfügung stehen, desto schwieriger gestaltet sich die Kalkbildung.

Phytoplankton und Bakterien bilden auch Dimethylsulfid (DMS), das im Oberflächenwasser des Ozeans gelöst ist, wovon im Jahresmittel ca 30 Millionen Tonnen in die Atmosphäre ausgasen. Dort oxidiert DMS über Dimethylsulfoxid und Schwefeldioxid zu Schwefelsäure, die zu Aerosoltröpfchen kondensiert. Über den Ozeanen ist DMS die dominante Quelle von Kondensationskeimen für die Wolkenbildung und beeinflusst damit chemische Prozesse in der Troposphäre.

Neben dem Kohlenstoffkreislauf beeinflussen der Stickstoff- und der Phosphorkreislauf das biologische Leben im arktischen Ozean. Spezialisierte Organismen nehmen im warmen Oberflächenwasser gasförmigen Stickstoff auf, der dem Phytoplankton sonst nicht zugänglich ist, und bringen ihn ins biologische Nahrungsnetz ein. Ozeanversauerung verbessert diese wichtige Stickstoffquelle, wodurch die Produktion organischen Materials und damit die biologische CO_2 -Pumpe verstärkt werden könnten. Mikroben, die am sauerstoffarmen Meeresboden leben, verarbeiten Stickstoff- und Sauerstoffverbindungen wieder zu Gas und geben es an die Atmosphäre ab. Während die Sauerstoff-Konzentrationen im Ozean sinken, geht mehr biologisch ver-

fügbaren Stickstoff verloren, und mehr Phosphor wird aus Tiefsee-Sedimenten gelöst. Wie diese Prozesse die biologische Produktivität des Ozeans bestimmen, ist noch sehr unsicher, aber von großer Bedeutung für das gekoppelte Klimasystem.

5. Erste Ergebnisse und Post MOSAiC Phase

Der abrupte Übergang von einer negativen AO Phase im November und Dezember 2019 zu einer ausgeprägten positiven AO Phase im Januar und Februar bis in den März 2020 hinein, war eine glückliche geophysikalische Fügung für das MOSAiC Projekt. Diese Konstellation erlaubte es exemplarisch, die außerordentliche Komplexität der nichtlinearen Verknüpfungen zwischen den Prozessen in der arktischen Atmosphäre, der Kryosphäre, dem Ozean und den biogeochemischen und Ökosystemprozessen in-situ zu untersuchen. Das arktische Klimasystem zeichnet sich durch eine starke natürliche Variabilität aus, die durch die globale Erwärmung in einer nie dagewesenen Weise verändert wird.

Abbildung 4 stellt die bodennahe Temperaturanomalie und die Bodenluftdruckanomalie im Winter 2019/20 im Vergleich zur Periode 2000-2020 dar. Man erkennt, dass die Temperaturen über dem arktischen Ozean kälter als im Mittel der letzten zwei Jahrzehnte waren und niedrigerer Luftdruck über der Arktis vorherrschte, wodurch die Bedingungen für winterliches Eiswachstum etwas besser als in den Jahren zuvor waren. Der niedrige Luftdruck über dem arktischen Ozean wie auch der höhere Luftdruck in mittleren Breiten und damit eine positive Phase der AO sind deutlich erkennbar. Dadurch blieben die arktischen Luftmassen über dem arktischen Ozean eingeschlossen und es fanden keine wesentlichen Intrusionen von Zyklonen aus mittleren Breiten in die Arktis und keine Kaltluftausbrüche aus der Arktis in die mittleren Breiten statt.

Die in-situ Messungen zusammen mit Satellitendaten erlauben eine Kartierung der arktischen Meereisanomalien durch Advektion und Eisdeformation sowie Eiswachstum über dem kalten arktischen Ozean, die besonders ausgeprägt in der Kara See auftraten (siehe Maslowski et al. 2020). Die stärkeren Eisanomalien in der Barents-Kara-See und die arktische Troposphäre beeinflussten den stratosphärischen Polarwirbel, der in diesem positiven AO Winter derart kalt war, dass stratosphärischer Ozonabbau in einer sonst nur in der Antarktis beobachteten Stärke stattfinden konnte (siehe Wohltmann et al. 2020).

Die hier erwähnten ersten Ergebnisse der während der MOSAiC Drift durchgeführten Messungen zum gekoppelten Klimasystem erfordern eine intensive Auswertung in einer Post-MOSAiC Phase. Dazu wurden verschiedene Projekte im Rahmen von BMBF, NSF und weiteren Funding Agencies beantragt und genehmigt.

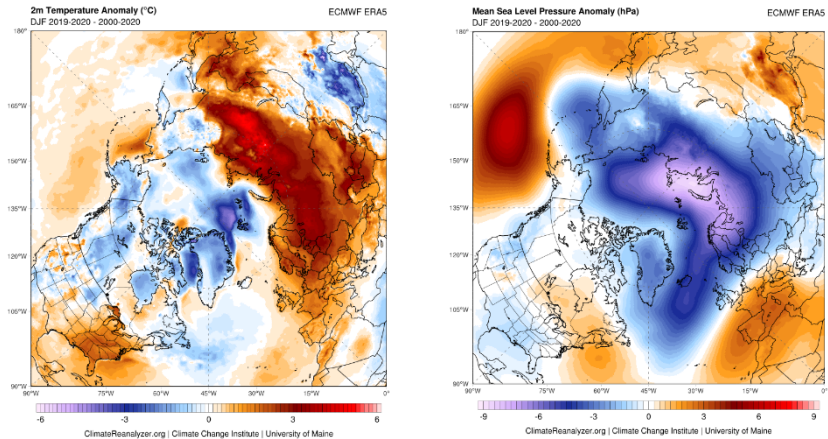


Abb. 4: Temperaturanomalie (links, °C) und Bodenluftdruckanomalie (rechts, hPa) für DJF 2019/20 im Vergleich zum Mittel 2000–2020

Acknowledgement

NCEP/NCAR Reanalyses Data/ Fig. 4 from Climate Reanalyzer (<https://ClimateReanalyzer.org>), Climate Change Institute, University of Maine, USA.

Literatur

- Cohen, J.; Screen, J.; Furtado, J. et al. (2014): Recent Arctic amplification and extreme mid-latitude weather. *Nature Geosci*, 7, S. 627–637, <https://doi.org/10.1038/ngeo2234>
- Inoue, J.; Yamazaki, A.; Ono, J. et al. (2015): Additional Arctic observations improve weather and sea-ice forecasts for the Northern Sea Route. *Sci Rep*, 5. <https://doi.org/10.1038/srep16868>
- Kruppen, T.; Birrien, F.; Kauker, F.; Rackow, T.; von Albedyll, L.; Angelopoulos, M.; Belter, H. J.; Bessonov, V.; Damm, E.; Dethloff, K.; Haapala, J.; Haas, C.; Hendricks, S.; Hoelle,

- mann, J.; Hoppmann, M.; Kaleschke, L.; Karcher, M.; Kolabutin, N.; Lenz, J.; Morgenstern, A.; Nicolaus, M.; Nixdorf, U.; Petrovsky, T.; Rabe, B.; Rabenstein, L.; Rex, M.; Ricker, R.; Rohde, J.; Shimanchuk, E.; Singha, S.; Smolyanitsky, V.; Sokolov, V.; Stanton, T.; Timofeeva, A.; Tsamados, M.: The MOSAiC ice floe: sediment-laden survivor from the Siberian shelf, *The Cryosphere Discuss.*, <https://doi.org/10.5194/tc-2020-64> (in press 2020)
- Maslowski, W. et al. (2020): Enhanced Arctic sea-ice anomalies in the Barents-Kara sea during winter 2020 based on Cryosat2 data and coupled regional model simulations (in preparation)
- Multidisciplinary drifting Observatory for the study of Arctic climate, 2016, Scienceplan, February, IASC, 75 S.
- Wendisch, M.; Brückner, M.; Burrows, J. P.; Crewell, S.; Dethloff, K.; Ebell, K.; Lüpkes, Ch.; Macke, A.; Notholt, J.; Quaas, J.; Rinke, A.; Tegen, I. (2017): Understanding causes and effects of rapid warming in the Arctic, *EOS*, 98, doi:10.1029/2017EO064803.
- Wohltmann, I. et al. (2020): Near complete local reduction of Arctic stratospheric ozone by severe chemical loss in spring 2020, *Nature communication*, submitted.