

## 4.7 Die Rolle ozeanischer Wärmetransporte für das Klima der Arktis im letzten Jahrtausend

JOHANN JUNGCLAUS

*The role of ocean heat transport variations for Arctic climate variations in the last millennium: Climate variability in the Arctic is governed by complex interactions between the sub-systems ocean, atmosphere, and sea ice. The Arctic heat budget is determined not only by radiation, but also by lateral heat advection. While the magnitude of the mean meridional heat transport is much larger in the atmosphere than in the ocean, anomalies are of similar magnitude on decadal time scales. Paleooceanographic reconstructions from sediment cores and model simulations indicate considerable variations in the Atlantic inflow toward the Arctic with consequences for sea-ice extent, ocean-atmosphere heat exchange, and pan-Arctic temperatures. During the last millennium, internal variability as well as variations driven by changes in the radiative forcing (solar activity, volcanic eruptions, greenhouse gas concentration) have contributed to respective changes in the oceanic circulation. The heat input into the Arctic, in particular onto the Barents Shelf, is associated with positive feedbacks that contribute to the »Arctic Amplification«, i.e. amplified warming at high northern latitudes.*

In den letzten Jahren standen Klimaveränderungen in der Arktis häufig im Blickpunkt des öffentlichen Interesses. Der drastische Rückgang der sommerlichen Meereisbedeckung (siehe Kap. 2.8 - Notz) gilt als eines der deutlichsten Zeichen für den fortschreitenden Klimawandel. Zudem gehören die hohen nördlichen Breiten zu den Gebieten mit der stärksten diagnostizierten Erwärmung, so dass man in der Klimaforschung vom Phänomen der »Arktischen Amplifikation« spricht. Der drastische Wandel in der Eisbedeckung des Ozeans, der saisonalen Schneebedeckung über Land, sowie das mit der Temperaturerhöhung einhergehende Abschmelzen von Gletschern und Eisschilden führt zu schwerwiegenden Veränderungen nicht nur im physikalischen System, sondern beeinflusst auch die Lebensbedingungen von Pflanzen, Tieren und Menschen. Klimavariationen in der Arktis werden durch komplexe Wechselwirkungen zwischen der Atmosphäre, dem Ozean, dem Meereis und dem Land bestimmt. In diesem Kapitel wenden wir uns der Frage zu, welche Rolle der Ozean und speziell der veränderliche Einstrom von warmen Wassermassen aus dem atlantischen Bereich für das Wärmebudget der Arktis spielen.

Um zu verstehen, inwieweit die durch verstärkten Eintrag von Kohlendioxid vom Menschen verursachte (anthropogene) Störung des Klimasystems für die Veränderungen in der Arktis verantwortlich ist, muss diese mit natürlichen Klimaschwankungen in Bezug gesetzt werden. Satellitenbeobachtungen der Meereisbedeckung stehen erst seit wenigen Jahrzehnten zur Verfügung und direkte Meereisbeobachtungen von Landstationen, Schiffen, oder schwimmenden Plattformen lassen sich mit geringer werdender Genauigkeit bis ins späte 19. Jh. zurückverfolgen. Ähnliches gilt für Temperaturbeobachtungen. Über den Beobachtungszeitraum der letzten 100–150 Jahre zeigen sich dabei schon deutliche Schwankungen in den Temperaturen auf Zeitskalen von Jahrzehnten. So war die Arktis in den

30er und 40er Jahren des 20. Jh. durch eine Warmphase geprägt, gefolgt von einer Abkühlungsphase bis in die 70er Jahre, die dann in den letzten Jahrzehnten von einer starken Erwärmung abgelöst wurde, die bis in die heutige Zeit andauert (JOHANNESSEN et al. 2004).

### Klimavariationen im vergangenen Jahrtausend

Wie stellen sich diese Klimaschwankungen aber im Kontext eines längeren Zeithorizonts dar, etwa der viel diskutierten Mittelalterlichen Warmperiode (um das Jahr 1000 AD) oder der Kleinen Eiszeit im 17.–18. Jahrhundert? Zur Erfassung von solchen Änderungen müssen indirekte Klimaindikatoren, sogenannte Proxies, eingesetzt werden. Das bekannteste Beispiel sind dabei die Dichte und Beschaffenheit von Baumringen, aus denen sich Rückschlüsse über Temperatur und Niederschlag ziehen lassen. An Land lassen sich weitere Informationen aus in Eisbohrkernen aufgezeichneten Isotopenverhältnissen sowie aus Seesedimenten gewinnen. Ein über die Arktis ausgedehntes Netzwerk solcher Proxies verwendeten KAUFMAN et al. (2009), um eine pan-arktische Temperaturrekonstruktion für die letzten 2000 Jahre zu erstellen. Charakteristisch für die Kaufman-Rekonstruktion ist eine langsame Abkühlung bis in die Mitte des 19. Jahrhunderts, die dann durch einen relativ steilen Temperaturanstieg abgelöst wird. Zu einem ähnlichen Ergebnis mit umgekehrten Vorzeichen bezüglich der Meereisbedeckung kommen KINNARD et al. (2011). Ihre auf eine Zusammenstellung verschiedener Proxies beruhende Rekonstruktion zeigt, dass auch der Rückgang des Meereises im 20. Jahrhundert ohne Beispiel im Kontext der letzten 1450 Jahre ist. In den letzten Jahren kommen zu den vornehmlich terrestrischen Klimaindikatoren Rekonstruktionen aus dem Ozean. Diese basieren auf Sedimentbohrkernen in Gegenden, in denen die Sedimentation eine hohe zeitliche Auflösung (etwa 1–10 Jahre) erlaubt. Bemerkenswert hinsichtlich des Wärme-

eintrags in die Arktis ist die Rekonstruktion der Temperatur des atlantischen Wassers in der Framstraße über die letzten 2000 Jahre (SPIELHAGEN et al. 2011). Die Autoren bestimmen die unterhalb der Meeresoberfläche in etwa 50–150 m Tiefe herrschende Temperatur aus dem Magnesium/Kalzium Isotopenverhältnis und der Menge und Charakteristik von aufgefundenen Plankton-Organismen (Foraminiferen). Einen einfachen, aber eindeutigen Hinweis auf die relativen Änderungen des atlantischen Einstroms ergibt das Verhältnis der Anwesenheit von Organismen polaren bzw. sub-polaren Ursprungs. Letztere müssen mit der ozeanischen Strömung aus dem sub-polaren Nordatlantik bzw. der Norwegischen See herangeführt worden sein. Auch Spielhagens Rekonstruktion ist von einem drastischen Temperaturanstieg in den letzten 150 Jahren gekennzeichnet. Dabei zeigt sich die aus Proxies abgeleitete Erwärmung von fast 2 °C in den letzten 100 Jahren konsistent mit direkten Temperaturmessungen aus Fjorden von Spitsbergen (PAVLOV et al. 2013). Auch in den Jahrhunderten vor der industriellen Revolution erkennt man Schwankungen in der Größenordnung von bis zu 1 °C. Diese reflektieren relativ warme Bedingungen in der mittelalterlichen Warmperiode und niedrigere Wassertemperaturen bzw. verringerten Eintrag von Atlantikwasser während der vorindustriellen Kleinen Eiszeit.

### **Das Klimasystem der Arktis und die Rolle lateraler Wärmetransporte**

Der ungleiche Strahlungseintrag in niedrigen und hohen Breiten führt dazu, dass Atmosphäre und Ozean mit ihren Winden und Strömungen bestrebt sind, den Temperaturunterschied zu minimieren. Zusammen transportieren beide Systeme auf jeder Erdhalbkugel je nach Breitengrad bis zu 6 Peta Watt (PW,  $1 \text{ PW} = 10^{15} \text{ Watt}$ ) an Wärmeenergie in polwärtiger Richtung. Bei 70 °N sind dies noch etwa 1,6 PW (SERREZE et al. 2007). Die lateral herangeführte Wärme wird nordwärts dieses Breitengrades fast vollständig in den Weltraum abgestrahlt. Während die Atmosphäre im zeitlichen Mittel den größten Teil des Wärmetransports übernimmt, sind Schwankungen auf einer Zeitskala von Jahrzehnten im ozeanischen wie atmosphärischen Anteil etwa gleich groß (JUNGCLAUS & KOENIGK 2010). Variationen in der Größenordnung von 0,01–0,02 PW, wie sie JUNGCLAUS & KOENIGK basierend auf Klimamodellsimulationen beschreiben, erscheinen zwar klein gegenüber dem Mittelwert, bedeuten aber, auf die Fläche der Arktis verteilt (die Polkappe nördlich von 67,5 °N umfasst in etwa  $15 \times 10^{12} \text{ m}^2$ ), einen Wärmefluss in der Größenordnung von 1 Watt/m<sup>2</sup>. Dass dies eine nicht zu vernachlässigende Größe ist, wird durch die Abschätzung von KWOK & UNTERSTEINER (2011) deutlich, die aussagt, dass ein solcher Wärmeeintrag

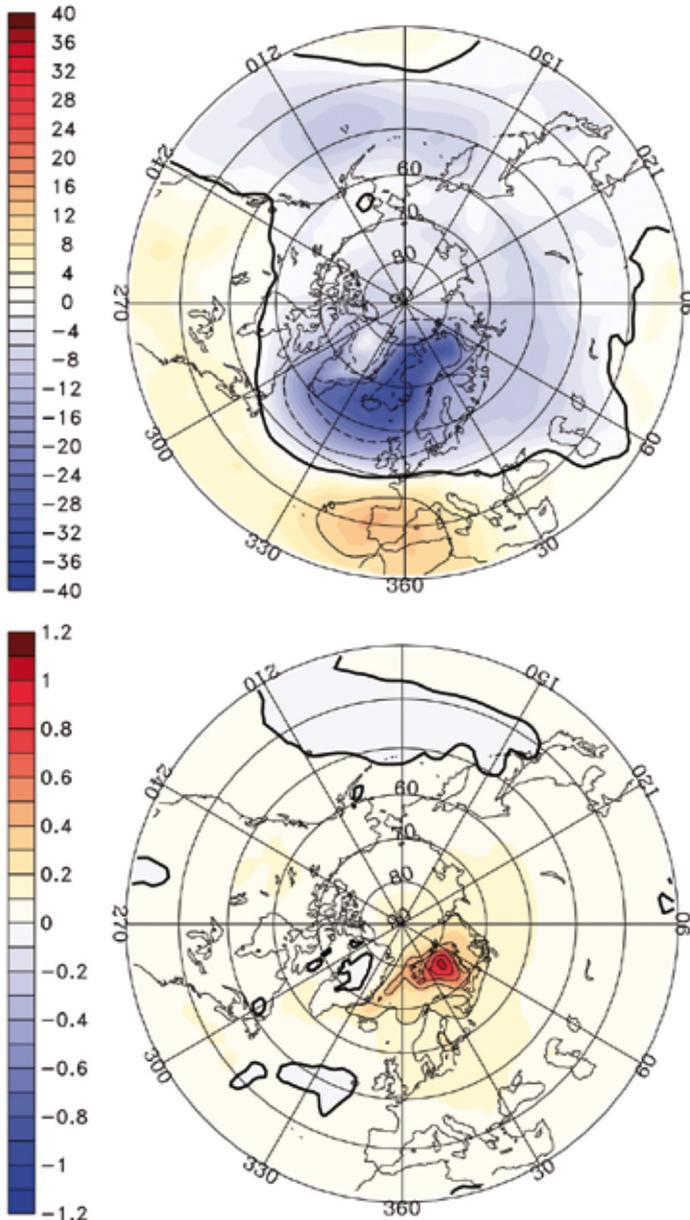
über die letzten Jahrzehnte ausreichen würde, den beobachteten Meereisrückgang zu erklären. Wir behaupten allerdings hier nicht, dass der Meereisschwund allein durch verstärkten Wärmetransport im Ozean zu erklären ist (s. auch Kap. 2.8 - NOTZ). In der Realität verteilen sich die Wärmeeinträge nicht gleichmäßig über die Arktis, sondern folgen, insbesondere im Ozean, speziellen Ausbreitungspfaden. Um die Klimawirkung von Änderungen im ozeanischen Wärmetransport zu verstehen, bedarf es zunächst eines Blickes auf die geographische Situation: Der Arktische Ozean ist ein von Landmassen fast vollständig umschlossenes Meeresbecken, das mit dem Weltozean nur über relativ kleine Öffnungen kommuniziert: Die Beringstraße, das zerklüftete kanadische Archipel, die Framstraße und die Öffnung zur Barents See zwischen Norwegen und Spitsbergen. Für das Wärmebudget der gesamten Arktis spielen die ersten beiden eine untergeordnete Rolle. Dagegen haben die Zugänge am Rande der Norwegen- bzw. Grönlandsee eine direkte Verbindung zu den atlantischen Wassermassen und beherbergen die nördlichen Ausläufer der globalen Umwälzzirkulation. Ferner bewirken die geo- und ozeanographischen Gegebenheiten noch eine Differenzierung des Eintrags in die Framstraße bzw. auf den Barentsschelf. Nördlich der mit bis zu 3.000 m recht tiefen Framstraße sind die Wassermassen stark geschichtet und eine permanente leichte und salzarme Schicht von Oberflächenwasser erlaubt dem eingetragenen Atlantikwasser nicht, an die Meeresoberfläche zu gelangen. Dieses breitet sich in Tiefen von einigen hundert Metern aus und Änderungen im Eintrag lassen sich über Jahre verfolgen. Auf dem relativ flachen Barentsschelf kann das atlantische Wasser dagegen leichter mit der Oberfläche in Berührung kommen. Ein Eintrag warmen Wassers kann dann großflächig zum Abschmelzen des Meereises führen. Dieser direkte Effekt auf das Eis ist aber nur ein Teil eines Mechanismus, der Ozean und Atmosphäre stark aneinander koppelt. Die Abwesenheit des Meereises hebt sozusagen den isolierenden Deckel vom besonders im Winter immer relativ warmen Ozean und erlaubt eine dramatischen Erhöhung der Wärmeabgabe des Ozeans an die Atmosphäre wobei Wärmeflusswerte von einigen hundert Watt/m<sup>2</sup> erreicht werden können. Diese Wärmeabgabe heizt die Atmosphäre nicht nur lokal auf, sie führt auch zu Änderungen im Luftdruck und damit in der atmosphärischen Zirkulation (s. Kap. 4.1 - DETHLOFF et al.). Unter Umständen kann dies lokal zu einer positiven Rückkoppelung führen, wie sie BENGTSOON et al. (2004) beschreiben: Die Wärmeabgabe auf dem Barentsschelf führt zur Ausbildung eines thermischen Tiefdruckgebietes, um das anomale Winde gegen den Uhrzeigersinn strömen. Das Druckgebilde kann gerade so gelagert sein, dass die Winde den Ein-

strom auf den Schelf zusätzlich anfachen, was erneut zu Eistrückgang und zu Wärmeverlusten führt, so dass sich der Mechanismus selbst verstärkt.

### Simulationsrechnungen des arktischen Klimas

Solche Zusammenhänge findet man auch in Simulationen mit gekoppelten Ozean-Atmosphäre Modellen. *Abb. 4.7.1* zeigt für das Erdsystemmodell des Max Planck Instituts für Meteorologie typische Muster für

Luftdruck- und Temperaturanomalien für Dekaden mit verstärktem ozeanischem Wärmetransport. Die Daten stammen aus einem sog. Kontrollexperiment, in dem es keine Variationen von externen Treibern wie Sonnenaktivität oder Kohlendioxidkonzentration gibt und geben damit ausschließlich intern generierte Schwankungen wieder. Deutlich erkennbar sind der Schwerpunkt der Erwärmung in der Barents See und die negative, zyklonal (gegen den Uhrzeigersinn) drehende Luftdruckanomalie darüber. Eine Korrelationsanalyse (*Abb. 4.7.2*)

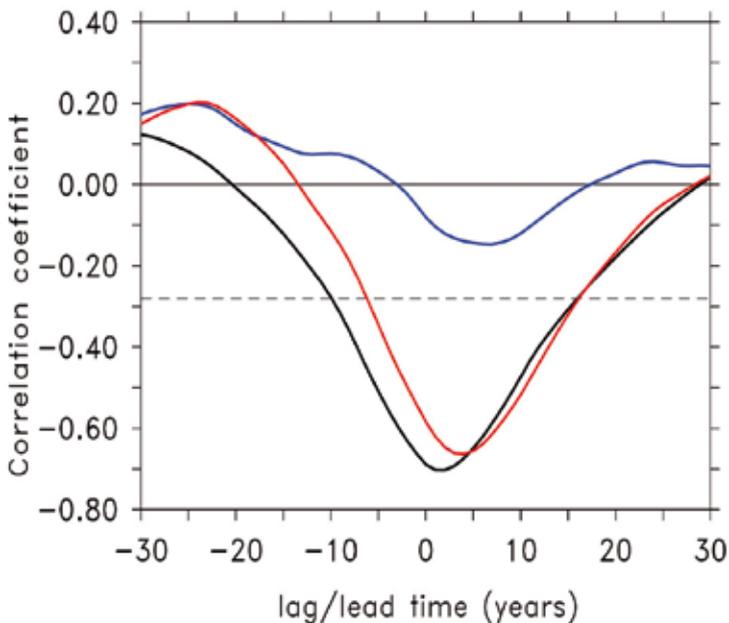


*Abb. 4.7-1: Regression des ozeanischen Wärmetransportes in die Arktis mit dem Bodenluftdruck (oben, in Pascal pro Standardabweichung des Wärmetransportes) und mit der bodennahen Lufttemperatur (unten, in Kelvin pro Standardabweichung des Wärmetransportes). Dargestellt ist die Situation ein Jahr nach dem Maximum im Wärmetransport. Alle Zeitreihen wurden mit einem 11-jährigen gleitenden Mittel geglättet.*

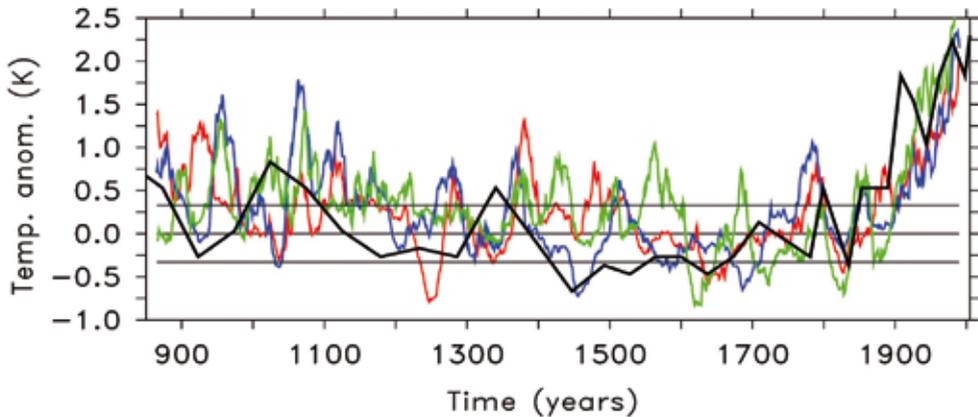
weist auf einen signifikanten Zusammenhang zwischen Eisausdehnung und dem ozeanischen Wärmetransport nicht nur in der Barentsschelf – Öffnung, sondern auch weiter südlich zwischen Island und Schottland hin, wobei die Änderungen in den Wärmetransporten dem Eisschwund zeitlich vorausgehen. Die Modellsimulationen belegen, dass beobachtete bzw. rekonstruierte Schwankungen wie die Warmperiode in den 1930er und 1940er Jahren oder die Periode geringer Eisbedeckung im 17. Jahrhundert, auf die KINNARD et al. (2011) hinweisen, durchaus auf natürliche Variationen der Ozeanströmungen und der atmosphärischen Zirkulation zurückgeführt werden können (BEITSCH et al. 2013). Dies gilt jedoch nicht für den Rückgang der Meereisbedeckung in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts. Nur Modellsimulationen, in denen die Störung des Klimasystems durch vermehrten Eintrag von Treibhausgasen und anthropogenen Aerosolen vorgegeben wird, erlauben eine Reproduktion des beobachteten Eisrückgangs. Die Trends der letzten Jahrzehnte liegen deutlich außerhalb der Schwankungsbreite natürlicher Variationen (Kap. 2.8 - NOTZ). Dennoch gibt es auch hier Hinweise, dass Veränderungen im ozeanischen Wärmetransport zu der überproportionalen Erwärmung der Arktis und zum Eisrückgang beigetragen haben. Die Temperaturen im atlantisch beeinflussten Bereich der Framstraße sind in den letzten 100 Jahren um ca. 2 °C gestiegen (PAVLOV et al. 2013) und die Rekonstruktion von SPIELHAGEN et al. (2011) stellt diese Erwärmung in den Kontext der letzten 2000 Jahre: Auch wenn die vergangenen zwei

Millennien durch Modulationen der Temperatur auf der Jahrhundertzeitskala geprägt ist, hat es in diesem Zeitraum niemals einen so drastischen Anstieg gegeben. Die Autoren beschreiben nicht nur die Temperaturerhöhung in der Framstraße sondern sprechen auch von verstärktem Wärmetransfer in die Arktis. Die Größe dieses zusätzlichen Wärmetransportes lässt sich allerdings aus den Proxies der Sedimentbohrkerne nicht bestimmen. Hier kann nun wieder das Klimamodell helfen. Die Simulationen über den Zeitraum der letzten 1200 Jahre, in die Annahmen über den Verlauf der Sonnenaktivität und Vulkantätigkeit ebenso eingehen wie die Variation der Treibhausgase, reproduzieren nicht nur die pan-arktische Temperaturentwicklung, sondern zeigen auch den bedeutenden Temperaturanstieg im 20. Jh. in der Framstraße in recht guter Übereinstimmung mit den Rekonstruktionen (Abb. 4.7.3). Aus dem Modell können wir dann den damit verbundenen Anstieg im Wärmetransport in die Arktis quantifizieren. Auch hier diagnostizieren wir einen signifikanten Anstieg um ca. 0,03 PW, sodass die rezenten Werte in etwa 40% über dem vorindustriellen Mittelwert liegen. Weitere Analysen zeigen, dass die Änderungen in den Ozeanströmungen mit weitreichenden Variationen in der Zirkulation der Atmosphäre verbunden sind, so dass wir es auch hier mit einem komplexen Wechselspiel der Klimakomponenten zu tun haben, deren Details bisher nicht vollständig verstanden sind.

Der verstärkte Wärmetransfer durch den Ozean ist sicherlich nur ein Baustein des viel diskutierten Kli-



**Abb. 4.7-2:** Korrelationskoeffizient als Funktion der Zeitverschiebung (x-Achse, in Jahren) zwischen ozeanischen Wärmetransporten in (blau) der Framstrasse, (rot) über dem Island-Schottland-Rücken, und (schwarz) in der Öffnung zum Barentsschelf mit der gesamtarktischen Meereisbedeckung. Positive Jahreszahlen bedeuten, dass die Änderungen in den Wärmetransporten denen der Eisbedeckung vorangehen. Negative Korrelationskoeffizienten zeigen eine Reduktion der Eisbedeckung bei positiven Wärmetransportanomalien an.



**Abb. 4.7-3:** Temperaturentwicklung (als Abweichung vom Mittel über die Periode 850–1850 AD) in der Framstraße bei etwa 50 m Tiefe: schwarze Linie: Rekonstruktion von SPIELHAGEN et al. (2011), farbige Linien: drei Realisationen von Simulationen über das letzte Jahrtausend mit dem Erdsystemmodell des Max-Planck-Institutes für Meteorologie. Die Rekonstruktionszeitreihe wurde der PANGAEA Datenbank entnommen (doi:10.1594/PANGAEA.755114).

mawandels in der Arktis und weitere Prozesse (s. Kap. 2.8 - NOTZ) tragen zur »Arktischen Amplifikation« bei. Ozeanische Messungen z.B. von Verankerungen in der Framstraße, dokumentieren die mittleren Wärmeeinträge in heutiger Zeit und, in gewissen Rahmen, auch deren Änderungen über Jahre und Jahrzehnte. Wesentlich schwieriger zu erfassen sind allerdings die Details der Mischungsprozesse im Inneren des Arktischen Ozeans und der Ozean-Atmosphäre Wechselwirkungen. Die hier besprochenen Resultate von Klimasimulationen müssen mit der Einschränkung betrachtet werden, dass ihnen Modelle zu Grunde liegen, die relativ grobe räumliche Auflösung besitzen und Vereinfachungen von Prozessen beinhalten (z.B. der Wolken), die möglicherweise nicht genug an die Gegebenheiten der Arktis angepasst sind. Dennoch sind die heutigen Klimamodelle so weit fortgeschritten, dass sie zumindest integrale Größen recht gut wiedergeben. Wie hier gezeigt wurde, erlaubt die gemeinsame Analyse von direkten Messungen, paläo-ozeanographischen Rekonstruktionen und Modellsimulationen, zu einem verbesserten Prozessverständnis zu kommen. Zum einen können Klimasimulationen mit dem tatsächlichen Verlauf der Temperaturentwicklung konfrontiert werden; zum anderen dienen die Modellexperimente dazu, die notwendigerweise räumlich spärlichen Aufnahmen des vergangenen Klimas in einen dynamisch konsistenten Kontext zu setzen und Ursachen zu erforschen.

Die Kombination verschiedener Informationsquellen lässt somit den Schluss zu, dass ozeanische Einflüsse eine wichtige Rolle für das Klima der Arktis in der Vergangenheit und Gegenwart gespielt haben und ihre Beobachtung und Modellierung eine wichtige Aufgabe für die Zukunft darstellen.

### Literatur:

- BEITSCH, A., J. H. JUNGCLAUS & D. ZANCHETTIN (2013): Patterns of decadal-scale Arctic warming events in simulated climate. Under review, *Clim. Dyn.*
- BENGTSSON, L., V. A. SEMENOV & O. M. JOHANNESSEN (2004): The early twentieth-century warming in the Arctic – a possible mechanism. *J. Climate*, 18, 4045-4057, doi:10.1175/1520-0442.
- JOHANNESSEN, O. M., L. BENGTSSON, M. W. MILES, S. I. KUZMINA, V. A. SEMENOV, G. V. ALEKSEEV, A. P. NAGURNYI, V. F. ZAKHAROV, L. P. BOBYLEV, L. H. PETERSSON, K. HASSELMANN & H. CATTLE (2004): Arctic climate change – observed and modeled temperature and sea-ice variability. *Tellus*, 56A, 328-341.
- JUNGCLAUS, J. H. & T. KOENIGK (2010): Low-frequency variability of Arctic climate: the role of oceanic and atmospheric heat transports. *Clim. Dyn.*, 34, 265-279, doi: 10.1007/s00382-009-0569-9.
- KAUFMAN, D. S., D. P. SCHNEIDER, N. P. MCKAY, C. M. AMMANN, R. S. BRADLEY, K. R. BRIFFA, G. H. MILLER, B. L. OTTO-BLIESNER, J. T. OVERPECK & B. M. VINTNER (2009): Recent warming reverses long-term Arctic cooling. *Science*, 325, 1236-1239, doi:10.1126/science.11733983.
- KINNARD, C., C. M. ZDANOWICZ, D. A. FISCHER, E. ISAKSSON, A. DE VERNAL & L. G. THOMPSON (2011) Reconstructed changes in Arctic sea ice over the past 1,450 years. *Nature*, 479, 509-512, doi:10.1038/nature10581.
- KWOK, R. & N. UNTERSTEINER (2011): The thinning of Arctic sea ice. *Physics Today*, 64(4), 36-41, doi:10.1063/1.3580491.
- PAVLOV, A. K., V. TVERBERG, B. V. IVANOV, F. NILSEN, S. FALK-PETERSEN & M. A. GRANSKOG (2013): Warming of Atlantic Water in two west Spitsbergen fjords over the last century (1912-2009). *Polar Research*, 32, 11206, doi:10.3402/polar.v32i0.11206.
- SERREZE, M. V., A. P. BARRETT, A. G. SLATER, M. STEELE, J. ZHANG & K. TRENBERTH (2007): The large-scale energy budget of the Arctic. *J. Geophys. Res.*, 112:D11122, doi:10.1029/2006JD008230.
- SPIELHAGEN, R. F., K. WERNER, S. A. SØRENSEN, K. ZAMELCYK, E. KANDIANO, G. BUDEUS, K. HUSUM, T. M. MARCHITTO & M. HALD (2011): Enhanced modern heat transfer to the Arctic by warm Atlantic Water, *Science*, 331, 450-453, doi:10.1126/science.1197397.

### Kontakt:

Dr. Johann Jungclaus  
Max Planck Institut für Meteorologie, Hamburg  
johann.jungclaus@mpimet.mpg.de