

5.3 Das aktuelle Abschmelzen des arktischen Meereises

DIRK NOTZ

Das aktuelle Abschmelzen des arktischen Meereises: Das Meereis in der Arktis ist in den letzten Jahren deutlich zurückgegangen. Satellitenmessungen ergeben dabei, dass die Ausdehnung des sommerlichen Meereises in der Arktis seit 1979 um fast eine Mio. km² pro Jahrzehnt abgenommen hat. Simulationen der Meereisentwicklung und sporadische Messungen deuten darüber hinaus darauf hin, dass sich auch die mittlere Dicke des Eises im gleichen Zeitraum deutlich reduziert hat. Die Gesamtmenge des Eisverlusts ist allerdings aufgrund von Messungenauigkeiten nicht genau bekannt. Weitestgehend sicher ist allerdings, dass der Gesamtrückgang des Eises weder durch interne Schwankungen des Klimasystems noch durch Rückkopplungen erklärt werden kann, sodass nur externe Faktoren als Hauptantrieb des Rückgangs infrage kommen. Die Sonneneinstrahlung in der Arktis hat dabei allerdings in den letzten Jahren eher abgenommen, was eine Zunahme des Eises zur Folge haben müsste. Da dies nicht beobachtet wurde, bleibt als wahrscheinlichste Hauptursache der beobachteten Veränderungen nur der menschengemachte Anstieg der Konzentration der Treibhausgase in der Atmosphäre.

The current melting of Arctic sea ice: Arctic sea ice has been retreating rapidly in recent years. Satellite observations show since 1979 a loss of almost 1 million square kilometres per decade in summer sea-ice extent, while simulations of Arctic sea-ice and sparse observational data also suggest a very rapid loss of ice thickness. However, the actual magnitude of the overall loss is still somewhat uncertain because of observational constraints. It is clear, however, that the observed retreat is too large to be explicable by internal variability. In addition, feedbacks cannot explain the magnitude of the retreat either, which hence must be driven by changes in the external forcing. Solar radiation has decreased over recent years, which would imply an increase in sea-ice coverage, opposite to what has been observed. The most likely driver of the observed changes is hence the increase in atmospheric greenhouse gas concentrations that is mainly caused by anthropogenic burning of fossil fuels.

Einschneidende Veränderungen in der Meereisbedeckung der Arktis in den letzten Jahrzehnten sind eines der augenfälligsten Anzeichen der laufenden Klimaänderungen. Durch den Rückgang des Eises wird dabei allerdings nicht nur der Klimawandel selbst augenfällig, sondern auch die unterschiedlichen Konsequenzen von großräumigen Veränderungen im Klimasystem der Erde treten zutage. So verändern sich zum Beispiel durch den Rückgang des Eises zwangsläufig die Lebensgewohnheiten der indigenen Bevölkerung in der Arktis, und es kommt zu erheblichen Veränderungen im regionalen Ökosystem mit einer Verschiebung hin zu solchen Arten, deren Lebenszyklus unabhängig vom Meereis abläuft. Auch ökonomisch zeigen sich erste Auswirkungen des Eisrückgangs, mit einer Zunahme der Exploration von Bodenschätzen auf dem Boden des Arktischen Ozeans und einer langsam ansteigenden Anzahl von Schiffen insbesondere in der Nordostpassage entlang der Küste Sibiriens. Geopolitisch haben die Veränderungen des Meereises ebenfalls ihren Niederschlag gefunden, was sich unter anderem in verschiedenen Eingaben der Arktisanrainer zur regionalen Zuteilung des Arktischen Ozeans zu den jeweiligen Hoheitsgebieten widerspiegelt.

In diesem Kapitel wird der Hintergrund des beobachteten Eisrückgangs näher beleuchtet. Zunächst wird dazu diskutiert, auf welche Beobachtungen wir uns bei einer Analyse des Eisrückgangs stützen können. Anschließend wird dann ausführlich auf die möglichen Gründe für die beobachtete Entwicklung des arktischen Meereises eingegangen.

Die beobachtete Entwicklung

Eine Analyse der Entwicklung von arktischem Meereis betrachtet sinnvollerweise die beiden Kernparameter, die das Gesamtvolumen des Meereises bestimmen: Zum einen die Fläche, die das Meereis insgesamt bedeckt, zum anderen die mittlere Dicke des Eises. Leider lassen sich diese beiden Parameter großräumig nicht direkt bestimmen, sondern nur über indirekte Messungen zum Beispiel mittels polarumlaufender Satelliten, die die Erdoberfläche kontinuierlich abtasten.

Für die Bestimmung der Gesamtfläche des Meereises sind hierbei Sensoren auf polar umlaufenden Satelliten gebräuchlich, die es erlauben, die Konzentration von Meereis in einer bestimmten Fläche des Ozeans zumindest indirekt abzuschätzen. Für entsprechende Messungen werden dabei zum Beispiel Satelliten verwendet, deren Sensoren die Mikrowellenemission der Oberfläche bestimmen können. Hierzu wird bei verschiedenen Frequenzen im Mikrowellen-Frequenzbereich die von der Erdoberfläche abgegebene Strahlung erfasst, woraus sich abschätzen lässt, welcher Prozentsatz einer bestimmten Fläche des Ozeans von Eis bedeckt ist und welcher Prozentsatz eisfrei ist.

Leider sind entsprechende Messungen allerdings mit teilweise erheblichen Unsicherheiten belastet, die einer zuverlässigen Abschätzung der Meereisfläche im Weg stehen. Eine der wichtigsten Unsicherheitsquellen bilden dabei Schmelztümpel, die in Sommermonaten große Teile der Eisoberfläche bedecken. Diese Schmelztümpel emittieren fast wie Meerwasser, sodass die Mikrowellen-Sensoren nicht zwischen Schmelztümpeln

und offenem Wasser unterscheiden können. Manche Algorithmen versuchen die hieraus resultierende Unterschätzung der Eisfläche zu kompensieren, wobei allerdings die Allgemeingültigkeit der entsprechenden Korrekturen nicht unbedingt gewährleistet ist. Dies führt insgesamt zu erheblichen Unsicherheiten in der Abschätzung der Gesamtfläche des arktischen Meereises, sodass z.B. im Zeitraum 1979-2005 Messungen mittels des NASA-Team Algorithmus (CAVALIERI et al. 1984) eine mittlere Fläche im September von 5,2 Mio. km² ergeben haben, wohingegen der Bootstrap-Algorithmus (COMISO et al. 1986) eine mittlere Fläche von 6,3 Mio. km² ergibt.

Trotz dieser Unsicherheiten bei der Abschätzung der Gesamtfläche stimmen die Algorithmen jedoch bei der Gesamtabnahme der Flächenausdehnung des arktischen Meereises sehr gut überein. Eine lineare Regression ergibt dabei für die letzten 35 Jahre eine Abnahme der zum Ende des Sommers bedeckten Fläche um fast eine Million km² pro Dekade, sodass die Ausdehnung des Meereises im September von 7 bis 8 Mio. km² in den 1980er Jahren auf inzwischen etwa 5 Mio. km² zurückgegangen ist. Der niedrigste vom Satelliten aus gemessene Wert wurde dabei im September 2014 beobachtet, er betrug nur noch etwa 3,5 Mio. km².

Diesen mit einigen Unsicherheiten behafteten Messungen der Eisabnahme stehen deutlich größere Unsicherheiten bei der Beobachtung der Eisdicke gegenüber. Erst seit wenigen Jahren ist es möglich, die Eisdicke vom Satelliten aus abzuschätzen. Entsprechende Messungen machen sich die Tatsache zunutze, dass das Meereis über die Wasseroberfläche hinausragt, und dieser sogenannte Freibord einen direkten Bezug zur Eisdicke hat. Durch Messung des Freibords vom Satelliten aus lässt sich daher wiederum indirekt die Eisdicke abschätzen, wobei die Dicke des auf dem Eis befindlichen Schnees die Dickenabschätzung empfindlich beeinflusst und zu weiteren Unsicherheiten führt.

Da diese Messungen erst seit wenigen Jahren möglich sind, lässt sich die langfristige Entwicklung der Eisdicke nicht durch direkte oder indirekte Messungen bestimmen. Als zuverlässigstes Instrument für die Abschätzung von Eisdickenänderungen gelten daher Modellsimulationen, die versuchen, den Verlauf der Meereisdicke und damit des Meereisvolumens so gut wie möglich nachzubilden. Entsprechende Simulationen mit dem PIOMAS Modell ergeben dabei eine Abnahme des Eisvolumens am Ende des arktischen Sommers von ca. 20.000 km³ in den 1980er Jahren auf Tiefstwerte von ca. 4.000 km³ in diesem Jahrzehnt (SCHWEIGER et al. 2011). Dieser Verlust von ca. drei Vierteln des arktischen Sommermeereises setzt sich dabei ungefähr zu gleichen Teilen aus einer simulierten Halbierung der Eisfläche wie aus einer simulierten Halbierung der Eisdicke zusammen.

Ein solch gewaltiger Verlust von Meereis innerhalb weniger Jahrzehnte wirft zwangsläufig die Frage auf, welche Faktoren den beobachteten Rückgang des Meereises ausgelöst haben könnten: Zum einen könnte der Eisrückgang einfach einer natürlichen Schwankung des Klimasystems geschuldet sein; zum zweiten könnten interne Wechselwirkung eine kleine Störung des Gleichgewichtszustands verursacht haben; und zum dritten könnten Änderungen im äußeren Antrieb des Klimasystems der Erde den Rückgang verursacht haben. Im Folgenden diskutieren wir diese drei Faktoren und machen dabei deutlich, warum nach aktuellem Forschungsstand vom Menschen verursachte Veränderungen im Klimasystem der Erde als Hauptursache für den beobachteten Rückgang gesehen werden.

Interne Klimavariabilität

Selbst wenn die äußeren Antriebsfaktoren konstant gehalten werden, zeigen viele Komponenten des Klimasystems unserer Erde aufgrund von interner Variabilität teilweise erhebliche Schwankungen. Solche Schwankungen werden dadurch verursacht, dass sich im Klimasystem der Erde kleinere Schwankungen gegenseitig aufschaukeln können, und es so zu messbaren Veränderungen in einzelnen Klimakomponenten kommt. Solche interne Variabilität führt zum Beispiel dazu, dass die Wetterbedingungen im Sommer in verschiedenen Jahren nicht identisch sind, sondern von einem Jahr zum nächsten teilweise erheblich schwanken können.

Ähnliche Schwankungen zeigt auch die Ausdehnung des arktischen Meereises, die sich in Computersimulationen von einem Jahr zum nächsten deutlich verändern kann, auch wenn der simulierte Klimaantrieb im Klimamodell konstant gehalten wird. Ähnliche Schwankungen sehen wir auch in langen Messreihen der Eisbedeckung in der Arktis, wie sie zum Beispiel seit den 1950er Jahren durch Schiff- und Flugzeugmessungen zur Verfügung stehen (vergleiche gestrichelte Linie in *Abb. 5.3-1*). Diese Schwankungen in der Ausdehnung des Meereises sind sowohl durch Veränderungen in Ozeanströmungen und damit durch Änderungen im ozeanischen Wärmetransport an die Eisunterseite hervorgerufen, wie auch durch Schwankungen der atmosphärischen Zirkulation.

Eine der vermutlich deutlichsten Ausprägungen von interner Variabilität für das arktische Meereis in erdgeschichtlich jüngerer Vergangenheit zeigt sich in der vergleichsweise geringen Ausdehnung des Meereises in den späten 1930er Jahren. Dänische Eiskarten zeigen zu dieser Zeit im Vergleich zum langjährigen Mittel einen deutlichen Rückgang des Meereises insbesondere in der Barentssee. Computersimulationen

deuten übereinstimmend daraufhin, dass sich dieser deutliche, allerdings regional auf den Eurasischen Sektor des Arktischen Ozeans beschränkte Eisrückgang durch Schwankungen in der Ozeanzirkulation erklären lässt. Durch einen verstärkten Zufluss von warmem Atlantischen Wasser war die Eisbildung insbesondere in der Barentssee mehrere Jahre lang erheblich erschwert, was deren geringe Eisbedeckung erklären kann.

Auch der heutige Eisrückgang verläuft nicht absolut monoton, sondern ist erheblichen Schwankungen unterworfen. Diese Schwankungen sind zum Teil durch interne Klimavariabilität zu erklären. Die Gesamtausprägung des Verlusts an Meereis in der Arktis ist allerdings so groß, dass er nicht allein durch interne Variabilität erklärt werden kann (vgl. gelbe Schattierung in *Abb. 5.3-1*). Sowohl Schiffs- und Flugzeugmessungen, als auch Modellsimulationen, die die interne Schwankungen des Meereises über viele Jahrhunderte nachbilden, ergeben eine Abschätzung der möglichen internen Schwankungsbreite, die deutlich kleiner ist als der beobachtete Rückgang. Um die Gesamtausprägung des Rückgangs zu verstehen müssen daher andere Faktoren in Betracht gezogen werden.

Rückkopplungen

Einer dieser Faktoren, der sich zunächst als mögliche Erklärung für den beobachteten Rückgang des Polareises anbietet, besteht in Wechselwirkungen des Klimasystems, die eine einmal begonnene Veränderung des Klimasystems verstärken oder dämpfen können. Schwankungen in der Meereisausdehnung erzeugen dabei eine Reihe von solchen Rückkopplungen, die daher zunächst einmal als geeignet erscheinen, den beobachteten Rückgang zu erklären.

Die wohl bekannteste dieser Rückkopplungen ist die verstärkende Eis-Albedo Rückkopplung. Dieser Begriff beschreibt die Tatsache, dass sich durch den Rückgang einer Eisfläche das Reflektionsvermögen (Albedo) der zuvor eisbedeckten Fläche deutlich verringert, wodurch der Ozean mehr Sonnenlicht aufnimmt. Diese zusätzliche Energie steht für das Abschmelzen weiteren Eises zur Verfügung, sodass sich ein einmal begonnener Rückgang des Eises immer weiter fortsetzen kann. Isoliert betrachtet könnte also diese (und andere) verstärkende Rückkopplung dazu führen, dass sich ein durch natürliche Schwankungen ausgelöster leichter Rückgang des Meereises soweit verstärkt, dass ein Kipppunkt überschritten wird und das verbleibende Eis unwiderruflich abschmilzt.

In den letzten Jahren hat eine Reihe von Wissenschaftlern untersucht, wie groß die Wahrscheinlichkeit ist, dass der beobachtete Rückgang des arktischen Meereises tatsächlich zu solch einem unumkehrbaren

weiteren Abschmelzen führen wird. Diese Studien sind übereinstimmend zu dem Ergebnis gekommen, dass ein solcher selbstverstärkter Rückgang des Eises äußerst unwahrscheinlich ist. Dieses macht allein schon eine Betrachtung der jährlichen Veränderungen in der Meereisbedeckung deutlich. Wäre der Rückgang tatsächlich selbstverstärkend, so würde man erwarten, dass das Eis nach einem Jahr mit extrem niedriger Eisbedeckung im nächsten Jahr noch weiter zurückgeht. Die Messdaten zeigen jedoch das genaue Gegenteil: Seit dem Beginn zuverlässiger Messungen hat sich das Eis immer nach einem extrem starken Rückgang im darauffolgenden Jahr wieder etwas erholt, der starke Rückgang wurde also immer wieder zumindest teilweise ausgeglichen.

Ein solches Verhalten der Zeitreihe lässt sich nur erklären, wenn solche Rückkopplungen die Entwicklung des Eises dominieren, die einen einmal begonnenen Verlust des Eises zumindest teilweise dämpfen. Die Dominanz dieser negativen Rückkopplungen erklärt, warum sich die Eisdecke in der Arktis trotz des erheblichen Eisverlusts der letzten Jahrzehnte immer noch zumindest zwischenzeitlich auf niedrigem Niveau für einige wenige Jahre stabilisiert.

Insbesondere drei Rückkopplungen tragen zur Stabilisierung der Eisdecke bei (NOTZ 2009, vgl. *Abb. 5.3-2*). Zum einen führt ein überdurchschnittlicher Rückgang von Meereis in einem bestimmten Sommer dazu, dass im anschließenden Herbst große Teile des Arktischen Ozeans von ausgedehnten, vergleichsweise warmen Wasserflächen bedeckt sind. Aufgrund ihrer hohen Temperatur geben diese Wasserflächen deutlich mehr langwellige Wärmestrahlung ab als das noch vorhandene Eis, was zu einer sehr effektiven Kühlung der Arktis beiträgt. Hierdurch wird die im Sommer durch den Eisrückgang zusätzlich aufgenommene Energie sehr schnell in den Weltraum abgestrahlt, sodass sich vergleichsweise rasch wieder ausgedehnte Eisflächen bilden können.

Dieses neugebildete Eis ist zunächst sehr dünn, woraufhin dann eine weitere stabilisierende Rückkopplung wirksam wird. Diese ausgedehnten Flächen mit sehr dünnem Eis führen nämlich sehr effektiv zu einer Zunahme der Eismenge in der Arktis, weil dünnes Eis deutlich schneller wachsen kann als dickes Eis. Dies liegt daran, dass für das Wachsen von Eis die Wärme des Ozeanwassers durch das Eis an die Atmosphäre abgeführt werden muss, was bei dünnem Eis deutlich effektiver geschehen kann als bei dickem Eis. Die Eismenge nimmt also sehr schnell zu und der Eisverlust des Sommers wird effektiv ausgeglichen.

Ein dritter Faktor, der dazu beiträgt den starken Eisverlust eines bestimmten Sommers zumindest teilweise auszugleichen, ergibt sich aus der unterschiedlichen Schneemenge, die das Eis nach einem Sommer mit ho-

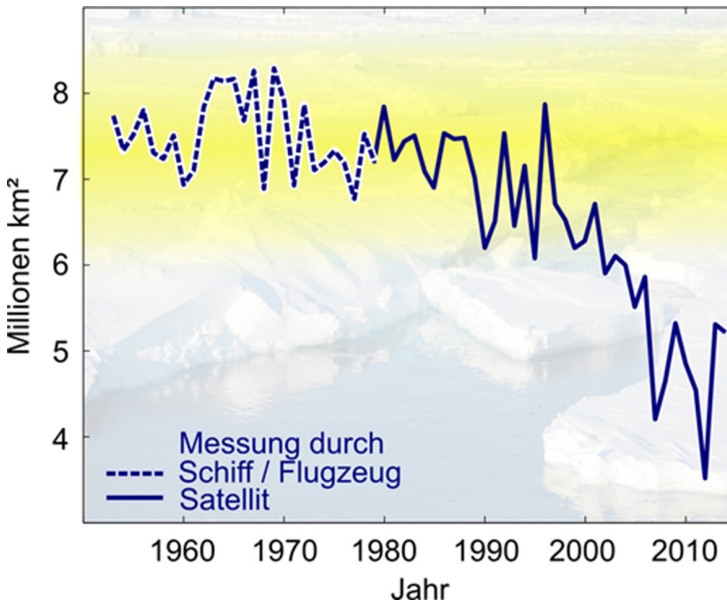


Abb. 5.3-1: Ausdehnung von arktischem Meereis im September. Die Messungen beruhen von 1953-1978 primär auf Abschätzungen von Flugzeug- und Schiffsmessungen, und von 1979-2014 primär aus Satellitenmessungen. Die gelbe Schattierung gibt eine Abschätzung der internen Variabilität an (vgl. NOTZ & MAROTZKE 2012).

hem Eisverlust bedeckt. Ähnlich wie dickes Eis langsamer wächst als dünnes Eis, wächst auch Eis mit einer dicken Schneedecke deutlich langsamer als Eis, das von wenig oder gar keinem Schnee bedeckt ist. Dies liegt daran, dass Schnee aufgrund seines hohen Luftanteils thermisch sehr gut isoliert, sodass die Wärmeleitfähigkeit nur etwa ein Fünftel der Wärmeleitfähigkeit von Eis beträgt. Da es einige Zeit dauert, bis die offenen Wasserflächen am Ende des Sommer zufrieren, wird die Schneedecke des sich dort bildenden Eises deutlich dünner bleiben als die Schneedecke des umgebenden Eises, das den Sommer überdauert hat. Hierdurch wächst das dünne, neue Eis den gesamten Winter über deutlich effektiver als das umgebende Meereis, was ebenfalls zu einer Erholung der Eisbedeckung nach einem starken Eisrückgang beiträgt.

Insgesamt führen all diese dämpfenden Rückkopplungen dazu, dass der verstärkende Effekt der Eis-Albedo Rückkopplung mehr als ausgeglichen wird und sich der Rückgang des Eises kaum selbst verstärkt, wozu auch die Tatsache beiträgt, dass die Eis-Albedo Rückkopplung nur im Sommer aktiv sein kann. Es bleibt also als Erklärung für den beobachteten Rückgang des Meereises nur ein letzter Faktor übrig, nämlich die Änderung im externen Antrieb. Diesen Punkt werden wir jetzt abschließend untersuchen.

Externer Antrieb

Die Menge an Meereis, die sich im Arktischen Ozean im Jahresmittel bilden kann, spiegelt direkt die in einem bestimmten Klimazustand herrschenden ozeanischen und atmosphärischen Bedingungen wieder. Aufgrund seiner geringen Dicke von maximal einigen Metern reagiert das Meereis schnell auf Änderungen in seinem äußere-

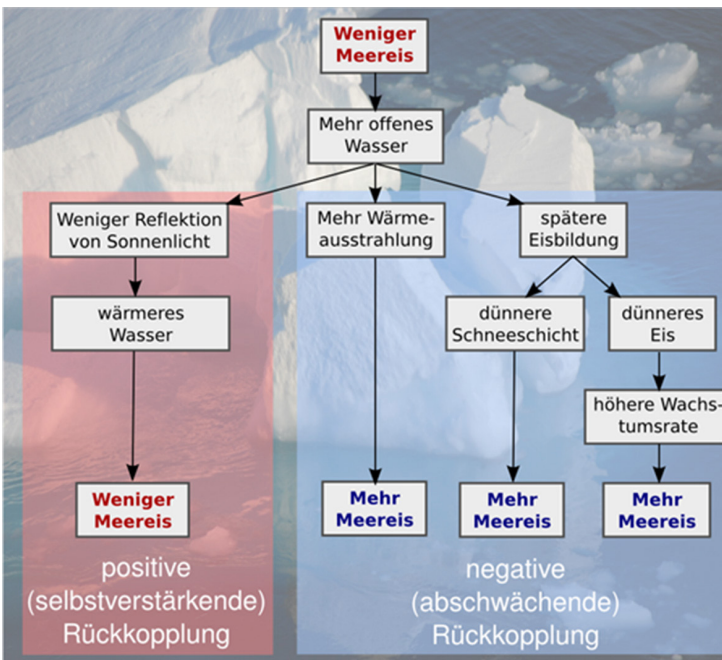


Abb. 5.3-2: Übersicht über wichtige Rückkopplungen, die eine begonnene Abnahme von Meereis entweder beschleunigen (positive Rückkopplung, primär im Sommer) oder abschwächen (negative Rückkopplung, primär im Winter).

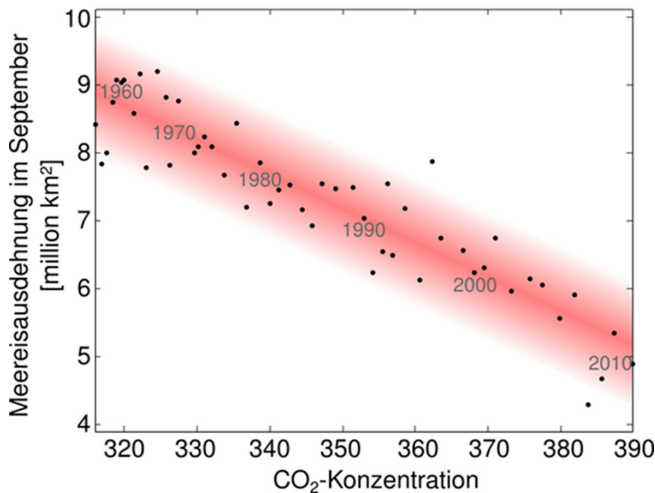


Abb. 5.3-3: Zusammenhang der mittleren jährlichen CO₂-Konzentration (x-Achse) und der arktischen Meereisausdehnung im September (y-Achse) für den Zeitraum 1959–2010 (nach NOTZ & MAROTZKE 2012).

ren Antrieb, der aus den unterschiedlichen Wärmeflüssen aus der Atmosphäre und dem Ozean zum Meereis hin besteht.

Erdgeschichtlich sind zwei Komponenten des externen Antriebs besonders maßgeblich für die Meereismenge, die sich für einen bestimmten Klimazustand in der Arktis bilden kann: Zum einen die Gesamtmenge an einfallender Sonnenenergie (kurzwellige Strahlung), zum anderen die Gesamtmenge an einfallender Wärmeenergie aus der Erdatmosphäre (langwellige Strahlung). Eine Analyse dieser beiden Strahlungsarten mittels Modellsimulationen zeigt deutlich, dass sich in den vergangenen Jahrhunderten die Meereismenge in der Arktis zunächst primär durch Veränderungen in der einfallenden Sonnenstrahlung verändert hat. Aufgrund von langsamen Änderungen in der Erdumlaufbahn um die Sonne nahm die Menge an einfallender Sonnenstrahlung in der Arktis insbesondere im Sommer in den letzten Jahrhunderten langsam ab, was in Modellsimulationen zu einer leichten Zunahme der Eisbedeckung führt (Abb. 5.2-1). Eine entsprechende Abnahme der Sonneneinstrahlung ist auch in den letzten Jahren gemessen worden; wäre also die Sonne der Hauptantrieb für die beobachteten Veränderungen, müsste die Eisfläche zunehmen. Im Gegensatz hierzu zeigt die Abnahme des Eises in den letzten Jahren einen deutlichen, physikalisch plausiblen Zusammenhang mit dem Kohlendioxidgehalt in der Atmosphäre (Abb. 5.3-3). Dieser Zusammenhang, der auch durch Modellsimulationen bestätigt wird, lässt es als äußerst wahrscheinlich erscheinen, dass der größte Teil der beobachteten Meereisabnahme direkt von der Menge an Kohlendioxid abhängt, die von uns Menschen in den letzten Jahren zusätzlich in die Luft freigesetzt worden ist. Durch das Kohlendioxid ändert sich die Wärmeabstrahlung der Atmosphäre zur Oberfläche des Landes, was einen direkten physikalischen Zusammenhang zwischen dem Anstieg des Kohlendioxids und dem Rück-

gang des arktischen Meereises ergibt (NOTZ & MAROTZKE 2011).

Zusammenfassung

In diesem Kapitel haben wir den Rückgang des Meereises in der Arktis näher untersucht. Wir haben dabei verdeutlicht, wie sehr das Meereis in der Arktis in den letzten Jahrzehnten zurückgegangen ist: sowohl die Fläche als auch die Dicke des Meereises im Sommer haben sich seit den 1980er Jahren etwa halbiert, was zusammengenommen bedeutet, dass das Eisvolumen um etwa drei Viertel zurückgegangen ist.

Eine Analyse der Ursachen für diesen Rückgang zeigt, dass nur der vom Menschen verursachte Anstieg an Treibhausgasen, insbesondere Kohlendioxid, eine plausible Erklärung für die Abnahme des Eises liefert. Interne Schwankungen können den beobachteten Rückgang ebenso wenig erklären wie Rückkopplungen innerhalb des arktischen Klimasystems. Schwankungen in der Sonnenenergie fallen ebenfalls als Erklärung für den Rückgang aus, da diese sich in der Arktis in den letzten Jahren eher verringert hat, was zu einer Zunahme des Eises führen müsste. Wie schon in Kapitel 5.2 gezeigt, liegt damit auch die zukünftige Entwicklung des arktischen Meereises vor allem in der Hand des Menschen.

Literatur

- CAVALIERI, D. J., GLOERSEN, P. & W. CAMPBELL (1984): Determination of sea ice parameters with the NIMBUS 7 SMMR, *J. Geophys. Res.*, 89, 5355–5369, doi: 10.1029/JD089iD04p05355, 1984.
- COMISO, J. C. (1986): Characteristics of Arctic winter sea ice from satellite multispectral microwave observations, *J. Geophys. Res.*, 91, 975–994, doi: 10.1029/JC091iC01p0975, 1986.
- NOTZ, D. (2009): The future of ice sheets and sea ice: Between reversible retreat and unstoppable loss. *Proc. Nat. Acad. Sci.*, 106(49), 20590–20595, 2009.
- NOTZ, D. AND J. MAROTZKE, Observations reveal external driver for Arctic sea-ice retreat. *Geophysical Research Letters*, 39(8), 2012.
- SCHWEIGER, A., R. LINDSAY, J. ZHANG, M. STEELE & H. STERN (2011): Uncertainty in modeled arctic sea ice volume, *J. Geophys. Res.*, doi:10.1029/2011JC007084, 2011.

Kontakt:

Dr. Dirk Notz
Max Planck Institut für Meteorologie, Hamburg
dirk.notz@mpimet.mpg.de

Notz, D. (2015): Das aktuelle Abschmelzen des arktischen Meereises. In: Lozán, J. L., H. Grassl, D. Kasang, D. Notz & H. Escher-Vetter (Hrsg.). *Warnsignal Klima: Das Eis der Erde*. pp.199–203. Online: www.klima-warnsignale.uni-hamburg.de. doi:10.2312/warnsignal.klima.eis-der-erde.30