

2.8 Veränderung der Dicke und Ausdehnung des Polarmeereises

DIRK NOTZ

Changes of the Thickness and Extent in the Sea-Ice: In recent years, the sea ice that covers large parts of the Southern Ocean and of the Arctic Ocean has evolved in strikingly different ways. In the Arctic, the volume of sea ice has decreased substantially, in particular in summer. Both thickness and extent have decreased by about 50% throughout the past decades. In the Antarctic, however, there seems to be even a small increase in sea-ice coverage. These differences come about by the different geographic setting. In the Arctic Ocean, the ice is largely trapped by the surrounding land masses. Hence, its extent depends primarily on air temperature. In the Southern Ocean, sea ice is instead free to drift. There, its extent depends primarily on wind patterns and oceanic temperature. For the future, model simulation show that Arctic summer sea ice will only continue to exist in wide spread areas if greenhouse gas emissions are quickly and drastically reduced.

Wenn im Winter die Lufttemperaturen in den Polarregionen weit unter den Gefrierpunkt absinken, bildet sich zwischen dem vergleichsweise warmen Wasser der Ozeane und der Luft ein erheblicher Temperaturunterschied. Dieser Temperaturunterschied führt dazu, dass der Ozean sehr effektiv Wärme an die darüber liegende Luft abgibt und sich dadurch langsam immer weiter abkühlt. Das sich abkühlende Salzwasser ist normalerweise schwerer als das darunterliegende Wasser, sinkt in die Tiefe und wird durch aufsteigendes, vergleichsweise warmes Wasser ersetzt. Dieser Vorgang setzt sich solange fort, bis die Temperatur des gesamten oberen Teils der ozeanischen Wassersäule am Gefrierpunkt liegt. Jeglicher darüberhinausgehender Wärmeeintrag führt im Ozean nicht mehr zum Verlust von sogenannter fühlbarer Wärme, die die vorhergehende Abkühlung verursacht hat, sondern zum Verlust von sogenannter latenter Wärme: die Wassermoleküle verlieren einen Teil ihrer potentiellen Energie und arrangieren sich in Form einer im Vergleich zum flüssigen Wasser relativ energiearmen Struktur. Es bildet sich Eis – das sogenannte Meereis, das das Thema dieses Kapitels sein soll. Wir werden im folgenden sehen, wie genau dieses Eis wächst und schmilzt, wie sich seine Ausdehnung und Dicke in der Arktis und Antarktis in den letzten Jahren verändert hat, und welche Ursachen diese Veränderungen haben. Eine der Kernfragen dabei wird sein, ob sich der immer weiter fortschreitende Verlust des arktischen Sommermeereises noch stoppen lässt, und warum das Meereis in der Antarktis im Moment keine Anzeichen für einen starken Eisrückgang erkennen lässt.

Das Wachsen und Schmelzen von Meereis

Anders als Süßwassereis ist Meereis kein nahezu reiner Festkörper. Das liegt daran, dass die im Meerwasser enthaltenen Salze nicht in die Kristallstruktur des Eisgitters eingebunden werden können. Beim Gefrieren von Meerwasser gefriert daher nur das im Meerwasser

enthaltenen Wasser. Das im Wasser enthaltene Salz wird von den Kristallen quasi zur Seite geschoben und dabei immer weiter konzentriert. Diese konzentrierte Salzsole wird von der Kristallstruktur umschlossen und bildet im Meereis ein kompliziertes System aus millimeterfeinen Kanälen, Einschlüssen und Kammern. Der Salzgehalt der Salzsole wird dabei derart von der Temperatur des umliegenden Eises bestimmt, dass sich immer ein Phasengleichgewicht zwischen der Salzsole und dem Eis einstellt. Kühlt sich Meereis ab, gefriert ein Teil des Wassers in der Salzsole, sodass die Sole höher konzentriert wird. Erwärmt sich Meereis, so schmilzt (genauer gesagt: löst sich) ein kleiner Teil der Süßwassereismatrix und verdünnt damit die Sole, bis sich wieder Phasengleichgewicht einstellt. Meereis hat daher, anders als Süßwassereis, keinen klar definierten Gefrierpunkt. Wenn sich das Eis abkühlt, nimmt der Anteil der flüssigen Einschlüsse ab, wenn sich das Eis erwärmt, nimmt der Anteil der flüssigen Anteile zu. Dies setzt sich bei weiterer Erwärmung solange fort, bis das Eis irgendwann vollständig geschmolzen ist.

Die Konzentration des Salzes in der Salzsole hängt also nur von der vorherrschenden Temperatur ab. Die Menge der Salzsole im Eis ändert sich hingegen sowohl durch Temperaturveränderungen, als auch schlicht und einfach dadurch, dass die hochkonzentrierte Salzsole mit ihrer höheren Dichte langsam unten aus dem Eis herausläuft. Geschmolzenes Meereis hat daher einen deutlich niedrigeren Salzgehalt als das Meerwasser, aus dem es sich ursprünglich gebildet hat.

Nachdem sich das Meereis einmal gebildet hat, wächst es im Laufe des Winters immer weiter an, indem durch das Eis hindurch Wärme vom Ozean an die Atmosphäre abgeführt wird. Hierdurch wird dem am Gefrierpunkt befindlichen Meerwasser weiterhin latente Wärme entzogen, so dass das Eis an seiner Unterseite immer weiter anwächst. Das Wachstum des Eises hängt dabei natürlich primär von der Wärmemenge ab, die durch das Eis transportiert werden kann. Bei gleicher Lufttemperatur kann dünnes Eis deutlich mehr Wärme leiten als

dickes Eis, weshalb bei gleichen Randbedingungen dünnes Eis deutlich schneller wächst als dickes Eis.

Auch Schnee spielt eine wichtige Rolle für die Geschwindigkeit des Wachsens von Meereis: Schon eine dünne Schneeschicht mit ihren zahlreichen Luft einschüssen isoliert sehr effektiv und vermindert damit den Wärmeaustausch zwischen Eis und Luft deutlich. Schneebedecktes Eis wächst daher viel langsamer als blankes Eis. Wird allerdings die Schneeeauflage auf dem Meereis so dick, dass die Eisoberseite unter Wasser gedrückt wird, kann Schnee auch dazu beitragen, dass das Eis wächst: In diesem Fall strömt nämlich Meerwasser seitlich auf das Eis hinauf, vermischt sich mit dem Schnee und gefriert. Hierdurch bildet sich sogenanntes Schneeeis, das insbesondere in der Antarktis in erheblichem Maße zur Eisbildung beiträgt.

Das Wachstum des Eises an seiner Unterseite setzt sich solange fort, wie ausreichend Wärme von der Eisunterseite an die Eisoberseite transportiert wird. Dies ist normalerweise solange der Fall, wie die Temperatur des Meerwassers nicht wesentlich vom Gefrierpunkt abweicht und solange die Temperatur an der Eisoberfläche niedriger ist als die Temperatur an der Eisunterseite. Letztere ist aus Gründen des Phasengleichgewichts gleichbedeutend mit der Gefriertemperatur des Meerwassers an der Eisunterseite und beträgt damit im Normalfall etwa $-1,8\text{ }^{\circ}\text{C}$. Die Temperatur an der Eisoberseite hingegen bestimmt sich aus dem Gleichgewicht der einfallenden und ausgehenden Wärmeflüsse. Flussgleichgewicht an der Oberseite des Eises bedingt, dass die Summe von eingehenden Strahlungsflüssen (langwellig und kurzwellig), von sensiblen und latenten Wärmeflüssen und von ausgehenden Strahlungsflüssen (langwellig und kurzwellig) genauso groß sein muss, wie die mittels Wärmeleitung durch das Eis transportierte Wärmemenge pro Zeiteinheit.

Irgendwann beim Übergang vom Frühling zum Sommer nehmen die atmosphärischen Flüsse soweit zu, dass Wärme von der Atmosphäre zum Eis transportiert wird. Hierdurch erreicht das Eis an der Oberseite irgendwann Temperaturen um die $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ und wird vollständig flüssig. Das Schmelzwasser sammelt sich in Tümpeln an der Eisoberseite, die sich aufgrund ihrer niedrigen Albedo (Reflektionsvermögen) durch Sonnenstrahlung effektiv erwärmen. Hierdurch wird dem System Eis/Ozean noch mehr Wärme zugeführt, und das Schmelzen dehnt sich immer weiter aus. Einzelne Schollen brechen auseinander, der freiwerdende Ozean erwärmt sich ebenfalls, und das warme Wasser trägt seinerseits zum Abschmelzen des Eises an den Seiten der Eisschollen und an deren Unterseiten bei.

Im Laufe des Sommers läuft Schmelzwasser durch das Eis hindurch und spült große Teile der verbliebenen

Salzsole aus dem Eis heraus. Falls das Eis den Sommer übersteht und im anschließenden Herbst wieder anfängt zu wachsen, hat es sich durch diese Prozesse in relativ salzarmes, zweijähriges Eis umgewandelt. Falls dieses zweijährige Eis weitere Sommer übersteht, wird es schließlich zu dem fast salzfreien, häufig einige Meter dicken mehrjährigem Meereis, das noch bis vor wenigen Jahrzehnten den größten Teil der arktischen Meereisdecke ausmachte. Inzwischen wird das Meereis in der Arktis jedoch von erstjährigem Eis dominiert, von Eis also, das sich erst im Laufe des vergangenen Winters gebildet hat und das im folgenden Sommer wieder komplett abschmilzt. Weitere Ausprägungen dieser Veränderungen, der möglichen Ursachen und der möglichen Folgen bilden den Schwerpunkt des folgenden Abschnitts.

Meereis in der Arktis: Beobachtete Veränderungen, Folgen und Ursachen

Veränderungen im arktischen Meereis sind eines der zuverlässigsten Frühwarnsysteme für einen stattfindenden globalen Klimawandel. Hierfür gibt es zwei Hauptursachen. Erstens reagiert Meereis aufgrund seiner geringen Dicke, die im Gegensatz zu den kilometerdicken kontinentalen Eismassen in Grönland oder der Antarktis nur maximal ein paar Meter beträgt, sehr schnell auf Klimaveränderungen. Zweitens ist eine globale Klimaveränderung normalerweise in den Polarregionen deutlich verstärkt (sogenannte »polar amplification«), sodass die Ausprägungen von Klimawandel insbesondere in der Arktis früher und stärker zu sehen sind als in anderen Teilen der Erde. Für diese polare Verstärkung des Klimawandels gibt es eine Reihe von Ursachen, deren relative Wichtigkeit nach wie vor nicht vollständig geklärt ist. Zum Beispiel kann polare Luft aufgrund ihrer niedrigen Temperatur nur relativ wenig Wasserdampf aufnehmen. Eine zusätzliche Wärmemenge führt daher, anders als zum Beispiel in den Tropen, vor allem zu einer Temperaturerhöhung und nur zu einer geringen Änderung des Wasserdampfgehalts der Atmosphäre. Darüber hinaus ist die polare Luft so trocken, dass bereits diese vergleichsweise geringe Änderung des Wasserdampfgehalts zu einer erheblichen Erhöhung der langwelligen Einstrahlung an der Erdoberfläche und damit zu einer Temperaturerhöhung führen kann. Auch der Rückgang des Meereises verstärkt die Erwärmung, da durch die Verringerung der großen, hellen Eisflächen und das Freiwerden dunkler Wasserflächen weniger kurzwellige Sonnenstrahlung reflektiert wird, sodass sich der Nettowärmeeintrag in die Arktis erhöht. Zum Teil wird dieser Effekt insbesondere im Sommer durch die Ausbildung niedrig liegender Wolkenschichten abgeschwächt, die ihrerseits Sonnenlicht reflektieren.

Die beschriebene Verstärkung von Klimaveränderungen in den Polarregionen ist ein sehr robustes Ergebnis von Modellsimulationen unterschiedlicher Komplexität und wird auch in Messdaten immer wieder nachgewiesen. So hat sich zum Beispiel die Temperatur in der Arktis in den letzten Jahrzehnten etwa doppelt so stark erhöht wie die globale Durchschnittstemperatur (vgl. Kap. 4.5 - Notz). Diese verstärkte Erwärmung hat ihrerseits dazu geführt, dass das Meereis in der Arktis insbesondere im Sommer stark zurückgegangen ist (vgl. Abb. 2.8-1). Die Ausdehnung des Eises hat sich im Vergleich zu den 1950er Jahren etwa halbiert, wobei zur Berechnung der Ausdehnung jene Ozeanfläche berücksichtigt wird, die zu mindestens 15 Flächenprozent von Meereis bedeckt ist. Ein neuer Negativrekord für den betrachteten Zeitraum wurde dabei im Jahre 2012 erreicht, als die Ausdehnung des Meereises zum Ende des Sommers nur noch etwa 3,4 Millionen Quadratkilometer betrug.

Zwar gibt es aufgrund unterschiedlicher Verfahren zur Bestimmung der Meereisausdehnung vom Satelliten aus gewisse Unsicherheiten bei der Abschätzung der genauen Fläche, die von Eisschollen bedeckt ist, die Abschätzung der Ausdehnung ist hingegen sehr zuverlässig. Es gibt daher insbesondere bei der Abschätzung des erfolgten Abnahme nur geringfügige Abweichungen zwischen verschiedenen Satellitalgorithmen: Die Ausdehnung des arktischen Meereises im Sommer ist im Mittel zwischen 1979 und 2012 um etwa 1 Mio. km² pro Dekade zurückgegangen.

Deutlich weniger zuverlässig lässt sich die Abnahme der Eisdicke in den letzten Jahrzehnten quantifizie-

ren, da es keinen langfristigen, arktisweiten Datensatz zur Eisdicke gibt. Erst die in den vergangenen Jahren gestarteten Satelliten IceSat, Cryosat und SMOS erlauben es, die Eisdicke mit einer gewissen Zuverlässigkeit arktisweit abzuschätzen. Punktuellere Messungen von U-Booten, Flugzeugen und Hubschraubern aus, die seit mehreren Jahrzehnten in der Arktis durchgeführt wurden, erlauben dennoch eine Abschätzung der Eisdickenänderung. Diese Messdaten zeigen übereinstimmend, dass sich die Eisdicke in der Arktis in den letzten Jahren deutlich reduziert hat. Abschätzungen gehen dabei davon aus, dass die Eisdicke in der Arktis heute im Mittel nur noch weniger als halb so groß ist wie in den 1950er Jahren. Diese Halbierung der Eisdicke in Zusammenschau mit der Halbierung der Eisausdehnung führt zu dem Ergebnis, dass das Volumen des heute in der Arktis vorhandenen Meereises nur noch maximal ein Viertel des Volumens in früheren Jahrzehnten beträgt.

Diese Abschätzung aus Beobachtungsdaten ist konsistent mit Modellsimulationen, die den Rückgang des Meereisvolumens abzuschätzen versuchen. Dabei wird in einem numerischen Modell des Arktischen Ozeans versucht, die Eisentwicklung der vergangenen Jahrzehnte nachzuvollziehen. Als Eingangsparameter in dieses Modell dienen vor allem Reanalysen zum jeweiligen Zustand der Atmosphäre in den letzten Jahrzehnten, beobachtete Veränderungen im ozeanischen Wärmetransport, sowie die beobachtete Eisausdehnung. Das wohl bekannteste Modell dieser Art ist PIOMAS, das an der University of Washington in Seattle entwickelt worden ist. Abschätzungen zur Eisdicke in diesem Modell stimmen sehr gut mit Beobachtungsdaten

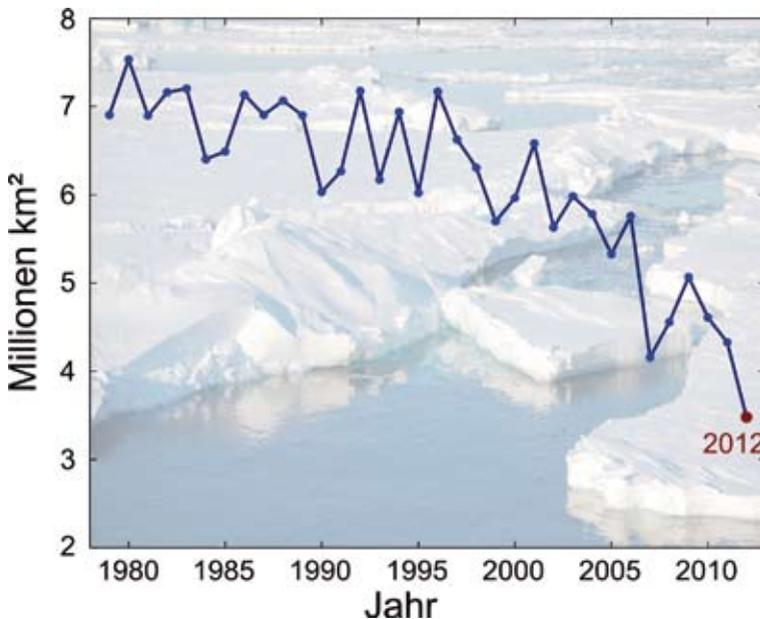


Abb 2.8-1: Entwicklung der Eisausdehnung im September in der Arktis. Dargestellt ist der Monatsmittelwert. Die Daten von 1953 bis 1978 stammen primär aus Schiffs- und Flugzeugmessungen, die Daten ab 1979 stammen von Satelliten. (Datensatz bis 1978: HadISST, ab 1979: NSIDC Sea-ice-Index).

überein und bestätigen die Aussage, dass das heutige Meereis in der Arktis im Sommer nur noch maximal ein Viertel seines früheren Volumens umfasst.

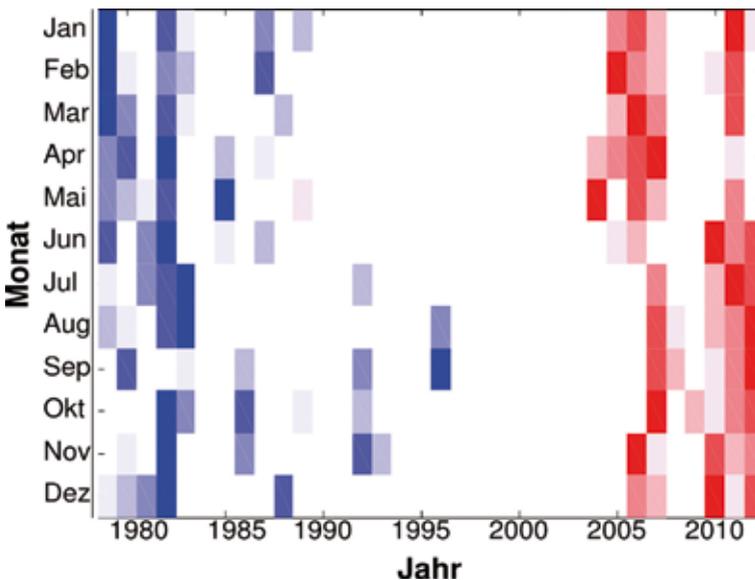
Zwar ist dieser Rückgang des Meereises im Sommer am stärksten ausgeprägt, grundsätzlich schwindet aber das Meereis in der Arktis in allen Monaten des Jahres (vgl. *Abb. 2.8-2*). Der Rückgang beim Wintermeereis ist dabei allerdings etwas weniger stark ausgeprägt, insbesondere weil (wie oben beschrieben) das heutzutage vorherrschende dünne Eis im Winter rasch wieder an Dicke zulegen kann und die mittlere Schneebedeckung auf erst-jährigem Eis im Mittel dünner ist als früher, weil sich das Eis in weiten Gebieten erst später im Jahr bildet.

Der gravierende Rückgang von Meereis in der Arktis hat eine Reihe von Folgen, von denen viele an anderer Stelle in diesem Buch näher diskutiert werden. Hierzu zählen zum Beispiel die Tatsache, dass sich mit dem Rückgang des Meereises der Lebensraum zahlreicher Tier- und Pflanzenarten verringert (Kap. 3.3 - WERNER), dass die Öffnung der Nordost- und der Nordwestpassage neue Schifffahrtsrouten in der Arktis eröffnet (Kap. 4.7 - LANGER et al., im Buch Warnsignal Klima: Die Meere - Änderungen & Risiken), dass zahlreiche Schelfgebiete eisfrei werden, sodass deren Bodenschätze ausgebeutet werden können (Kap. 1.8 - PIEPJOHN), dass hieraus ein großes geopolitisches Interesse an der nationalen Aufteilung des Arktischen Ozeans erwächst (Kap. 5.10 - PROESSL) und dass sich bereits heute mit dem Rückgang des Eises die Lebensbedingungen vieler indigener Bewohner der Arktis radikal ändern (Kap. 1.5 - MÜLLER-WILLE & THANNHEISER).

Auch einige der klimatologischen Folgen des Eisrückgangs werden im Hauptkapitel 4 näher be-

trachtet. Hier seien daher nur kurz einige dieser klimatologischen Folgen aufgelistet. Zunächst führt der Rückgang des Meereises, wie beschrieben, zu einer verstärkten Aufnahme von Solarenergie im Arktischen Ozean, was zur polaren Verstärkung der Klimaerwärmung beiträgt. Darüber hinaus wird das Eis aufgrund seiner geringeren Dicke im Sommer stärker aufgebrochen, wird dadurch mobiler und schmilzt teilweise in anderen Regionen als früher. Da beim Abschmelzen des Eises Süßwasser in den Ozean eingetragen wird, ändert sich hierdurch ebenso die Dichteverteilung des Meerwassers wie durch die Tatsache, dass sich der Jahresgang des Meereises verändert hat: aufgrund seiner häufig nur noch geringen Dicke wird teilweise im Winter mehr neues Eis gebildet als früher, wodurch dann auch entsprechend mehr flüssige Salzsole in den Ozean gelangt. Diese Dichteänderungen des Meerwassers wiederum beeinflussen die thermohaline Zirkulation der Weltmeere. Auch die Atmosphäre wird in erheblichem Maße vom Rückgang des Meereises beeinflusst. Wie in Kap. 4.1 (DETHLOFFS et al.) beschrieben, wird durch die ausgedehnten eisfreien Gebiete mehr Wärme von unten in die Atmosphäre eingetragen, wodurch sich die Luftdruckverteilung in der Arktis und in den angrenzenden gemäßigeren Breiten verändern kann. Eine mögliche Abnahme des Jetstreams und häufigere Kaltlufteinbrüche nach Zentraleuropa könnten die Folge sein (vgl. z.B. HONDA et al. 2009).

Betrachtet man die Ursachen des starken Rückgangs des arktischen Meereises, so zeigen sowohl Messdaten als auch Modellsimulationen einen klaren Zusammenhang der eisbedeckten Fläche mit der Konzentration von Kohlendioxid in der Erdatmosphäre (*Abb. 2.8-3a*).



*Abb 2.8-2: Darstellung der Verteilung von Rekordminima und Rekordmaxima in der Ausdehnung des arktischen Meereises. Für jeden Monat sind die Jahre mit der jeweils höchsten Meereisausdehnung in **blau** markiert, die Jahre mit der jeweils niedrigsten Ausdehnung in **rot**. Die Stärke der Farbe gibt die Reihenfolge an: das dunkelste Rot markiert das Jahr mit der niedrigsten Ausdehnung, das dunkelste Blau das Jahr mit der höchsten Ausdehnung.*

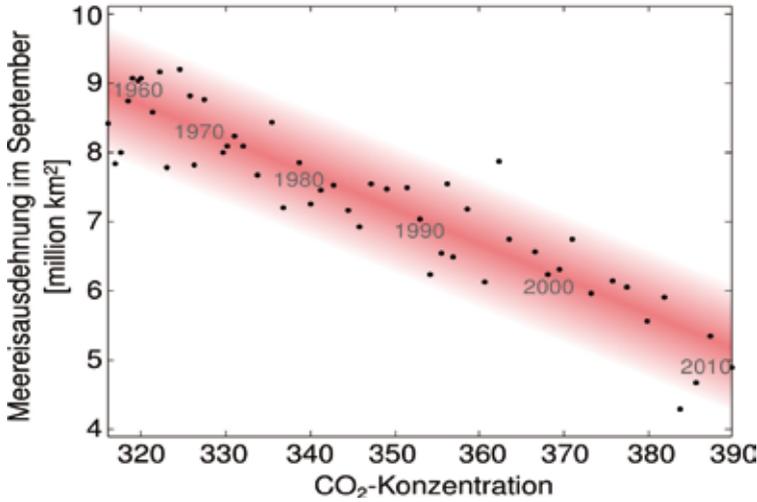
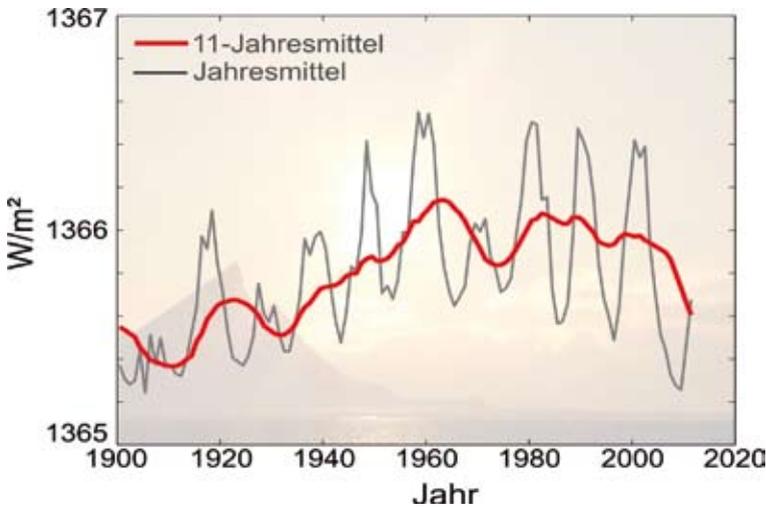
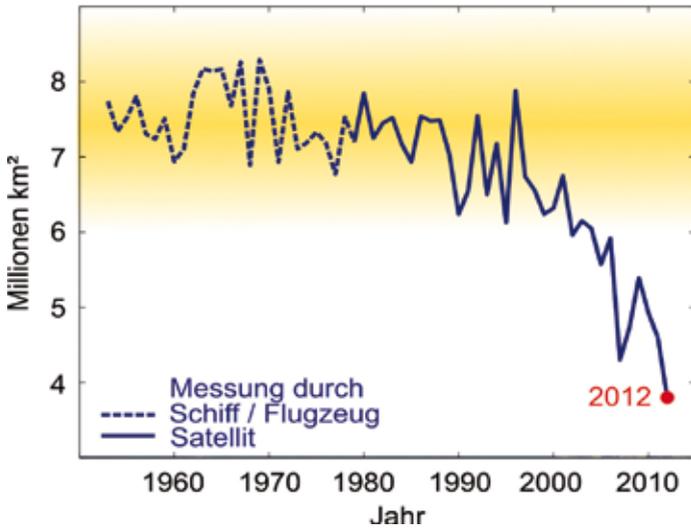


Abb. 2.8-3: (a) Entwicklung der CO₂ Konzentration und der Meereisausdehnung im September für den Zeitraum 1960 bis 2010. (b) Abschätzung der natürlichen Variabilität der Meereisausdehnung im Sommer (Datenanalyse: NOTZ & MAROTZKE 2012). (c) Entwicklung der Sonneneinstrahlung in den letzten Jahrzehnten (Datenquelle: PMOD/WRC (version d41_62_1102)).



Gemäß diesem Zusammenhang ist es sehr wahrscheinlich, dass der größte Teil des Eisrückgangs direkt vom anthropogenen Klimawandel verursacht worden ist. Andere Faktoren, die ebenfalls die Ausdehnung des Meereises beeinflussen, spielen demnach keine große Rolle für den beobachteten Rückgang. Ein Teil des Rückgangs lässt sich zwar noch durch interne Schwankungen im Klimasystem erklären (Abb. 2.8-3b), aber insbesondere im letzten Jahrzehnt ist die Eisbedeckung so niedrig geworden, dass solche internen Schwankungen die Ausprägung des Eisverlusts nicht mehr erklären können. Auch zur Sonneneinstrahlung gibt es keinen physikalisch plausiblen Zusammenhang, der den beobachteten Eisverlust erklären würde: Die Sonneneinstrahlung ist in den letzten Jahren eher schwächer geworden (Abb. 2.8-3c), das Eis in der Arktis hätte also eher zunehmen müssen, wenn die Sonne tatsächlich der Hauptantrieb der Veränderungen gewesen wäre. Auch andere Faktoren, wie ozeanische Wärmetransporte, Vulkanausbrüche, oder Änderungen in den vorherrschenden Zirkulationsmustern scheiden als Erklärung für den Eisrückgang aus (vgl. NOTZ & MAROTZKE 2012).

Auch in Simulationen der Meereisentwicklung über die letzten hundert oder sogar tausend Jahre zeigt sich der dominierende Einfluss von CO₂: Zeigen entsprechende Simulationen für frühere Jahrhunderte eine leichte Zunahme des Meereises, die mit einer geringeren Sonneneinstrahlung in der Arktis aufgrund von Veränderungen der Erdumlaufbahn zusammenhängt, ergibt sich für die letzten Jahrzehnte ein gravierender, mit Beobachtungsdaten konsistenter Rückgang des Meereises in den Modellsimulationen, der durch den simulierten Anstieg der CO₂ Konzentration in der Atmosphäre in den letzten Jahrzehnten verursacht wird. Entsprechend kennzeichnet der IPCC in seinem im September 2013 vorgelegten Bericht den menschlichen Beitrag zum Eisrückgang in der Arktis als »sehr wahrscheinlich«, was in der Nomenklatur des IPCC einen Unsicherheitsbereich von weniger als 10% bezeichnet.

Meereis in der Antarktis: Beobachtete Veränderungen und deren Ursachen

In der Antarktis verläuft die beobachtete Entwicklung des Meereises in den letzten Jahrzehnten fundamental anders als in der Arktis: Das Meereis im Südlichen Ozean geht im Moment nicht zurück, sondern scheint sich in den letzten Jahrzehnten sogar leicht auszudehnen. Leider ist die Datenlage zum antarktischen Meereis aufgrund seiner isolierten geographischen Lage noch weitaus dünner als jene zum arktischen Meereis, sodass sich eine Analyse der Veränderungen auf den Parameter Eisausdehnung beschränken muss und nur der zuverlässig von Satelliten erfasste Zeitraum seit 1979 (bzw. vereinzelt

Messungen seit den frühen 1970er Jahren) beschränken muss.

In diesem Zeitraum hat sich die Ausdehnung im Jahresmittel um etwa 0,1 Mio. km² pro Dekade erhöht, wobei es jedoch regional stark unterschiedlich ausgeprägte Entwicklungen der Eisbedeckung gab. So ist in diesem Zeitraum die Eisbedeckung insbesondere im Rossmeer angestiegen, wohingegen sie in weiten Bereichen um die antarktische Halbinsel zurückgegangen ist.

Eine solche regional stark unterschiedliche Entwicklung ist in der Arktis nicht zu beobachten; dort geht das Eis in allen Regionen zurück. Dieser Unterschied deutet bereits auf eine der wahrscheinlichsten Ursachen für die unterschiedliche Entwicklung des Meereises in der Arktis und der Antarktis hin. In der Arktis ist das Eis im Arktischen Ozean nahezu ringsum von Landmassen eingeschlossen und kann sich damit nicht frei bewegen. Die Ausdehnung des Eises wird damit in erster Linie durch thermodynamische Schmelz- und Gefrierprozesse beeinflusst, die zu einem Schrumpfen bzw. Wachsen der Eisdecke führen. Der Großteil des Schmelzens fand dabei in früheren Jahrzehnten vor allem an der Eisoberseite statt, weil die Temperaturen in der Arktis im Sommer hinreichend hoch steigen, um eine Eisschmelze hervorzurufen.

Im Gegensatz zum Arktischen Ozean kann das Eis im Südlichen Ozean weitestgehend ungebunden treiben. Die Lufttemperaturen sind in dieser Region so niedrig, dass das Schmelzen primär an der Eisunterseite stattfindet, sobald das Eis in Regionen mit wärmerem Ozeanwasser treibt. Im Gegensatz zur Arktis hängt die Eisausdehnung in der Antarktis damit in erster Linie von den vorherrschenden Winden ab, die das ungebunden treibende Eis je nach Windrichtung über eine mehr oder weniger große Fläche ausbreiten können und das Eis dabei über mehr oder weniger warmes Ozeanwasser schieben.

Dieser dominierende Einfluss der atmosphärischen Zirkulation erklärt gut die regional unterschiedlichen Trends in der Meereisbedeckung in der Antarktis: In den letzten Jahren haben sich die dominierenden Luftdruckverhältnisse in der Antarktis derart geändert, dass sich insbesondere das über dem Amundsen- und Bellinghousenmeer befindliche Tiefdruckgebiet verstärkt hat. Die entsprechende Luftdruckabnahme führte zu verstärkten kalten, südlichen Winden im Gebiet des Rossmeeres, was die Zunahme der Eisbedeckung dort erklärt.

Wodurch sich die Luftdrucksysteme in der Antarktis in den letzten Jahren geändert haben, ist bisher noch weitestgehend unverstanden. Modellsimulationen zeigen teilweise ebenfalls eine Abnahme des Luftdrucks in Küstenregionen der Antarktis, wobei Sensitivitätsstudien diese Abnahme in direkten Zusammenhang sowohl mit der erhöhten Konzentration von Treibhausgasen als auch mit der Abnahme der Ozonkonzentration im Ozon-

loch der südlichen Stratosphäre bringen. Die Zunahme des Meereises wäre daher auch in Modellsimulationen kompatibel mit dem Anstieg der Treibhausgaskonzentrationen, wobei der Wirkzusammenhang im Vergleich zur Arktis wie beschrieben ein deutlich anderer ist. Angemerkt sei noch, dass auch Veränderungen in den Niederschlagsmustern im Südlichen Ozean als Erklärung für die Eiszunahme vorgeschlagen worden sind. Durch eine Zunahme von Niederschlägen in einem wärmeren Klima würde die ozeanische Konvektion geschwächt werden, wodurch weniger warmes Wasser aus den Tiefen des Ozeans an die Oberfläche gelangen würde. Hierdurch würde das Abschmelzen des Eises an seiner Unterseite abnehmen, was die Eiszunahme erklären könnte. Bisher ist allerdings die Datenlage für einen gesicherten Test dieser Hypothese nicht ausreichend.

Ausblick

Nach diesem Überblick über die Eisentwicklung in der Vergangenheit stellt sich natürlich unweigerlich die Frage nach der aller Voraussicht nach bevorstehende Eisentwicklung sowohl in der Arktis als auch in der Antarktis. Für die Arktis sagen Klimamodelle und Plausibilitätsstudien dabei übereinstimmend voraus, dass die weitere Entwicklung des Meereises vor allem von der weiteren Entwicklung der atmosphärischen Randbedingungen abhängt. Das bedeutet insbesondere, dass nach derzeitigem Forschungsstand die in der öffentlichen Diskussion häufig dargestellte Abwärtsspirale aus weniger Meereis, damit höherer Albedo, damit wärmerem Wasser, und damit wiederum weniger Meereis keine dominierende Rolle spielen wird. In Modellsimulationen hängt die Entwicklung des Eises weitaus weniger von seinem internen Zustand als von den äußeren Randbedingungen ab.

Die Tatsache, dass die geschilderte Abwärtsspirale keinen Automatismus darstellt, liegt insbesondere darin begründet, dass eine Reihe von internen Prozessen die Abnahme des Meereises verlangsamen kann. Zum Beispiel kann, wie eingangs geschildert, in eisfreien Gebieten im Winter sehr effektiv neues, dünnes Eis wachsen, sodass ein Teil des Eisverlusts im vorangegangenen Winter überkompensiert wird. Dieser Mechanismus erklärt unter anderem, warum wir bereits in der Vergangenheit normalerweise nach einem Jahr mit einer sehr starken Eisabnahme im darauffolgenden Jahr eine leichte Erholung der Eisbedeckung gesehen haben. Wäre die Abwärtsspirale hingegen so effektiv wie häufig beschrieben, dann müsste gerade nach einem Jahr mit einem extremen Eisrückgang ein Jahr mit noch stärkerem Eisrückgang folgen. Weitere Prozesse, die die Abnahme des Eises etwas verlangsamen, sind die im Mittel dünnere Schneede-

cke auf dem sich erst spät im Jahr bildenden dünnen Eis und vor allem auch die Tatsache, dass sich die Wärmeausstrahlung vom Arktischen Ozean umso mehr erhöht, je weniger er von Eis bedeckt ist.

Modellsimulationen des externen Antriebs deuten für die Zukunft darauf hin, dass der Eisverlust in der Arktis grundsätzlich noch gestoppt werden kann, falls der Anstieg der Treibhausgaskonzentration gestoppt wird. Der neue, im September 2013 vorgelegte IPCC Bericht beschreibt entsprechend, dass bei einer Halbierung der Treibhausgasemissionen bis zum Jahr 2050 und einer Abnahme der Emissionen auf null in den darauffolgenden Jahrzehnten der Verlust des Sommermeereises in der Arktis verhindert werden könnte (sogenanntes Szenario RCP 2.6). In Szenarien mit einer höheren Treibhausgasemission geht das Meereis im Sommer immer weiter zurück, bis es im Laufe dieses Jahrhunderts in vielen Modellsimulationen nahezu vollständig verschwunden ist. In Szenarien mit einem sehr hohen Ausstoß an CO₂ schwindet in einigen Simulationen im Laufe des nächsten Jahrhunderts sogar das Meereis im Winter vollständig.

Alle Simulationen stimmen dabei darin überein, dass die Schwankungen der Meereisbedeckung in der Arktis in den nächsten Jahren zunehmen werden. Das hängt damit zusammen, dass das inzwischen sehr dünne Eis empfindlicher auf das jeweils vorherrschende Wetter reagiert. Insbesondere kann die Eisbedeckung aufgrund dieser internen Variabilität durchaus für einige Jahrzehnte ansteigen, der langfristige Trend einer abnehmenden Eisbedeckung bei erhöhter CO₂ Konzentration wäre davon unberührt.

Für die Antarktis werden gemäß entsprechender Modellsimulationen interne Schwankungen noch auf viele Jahrzehnte hinaus die Entwicklung der Eisbedeckung bestimmen. Die Simulationen deuten allerdings daraufhin, dass spätestens zum Ende des Jahrhunderts auch im Südlichen Ozean das Eis zurückgegangen sein wird.

Literatur

- HONDA, M., J. INOUE & S. YAMANE (2009): Influence of low Arctic sea-ice minima on anomalously cold Eurasian winters, *Geophys. Res. Lett.*, 36, L08707, doi:10.1029/2008GL037079.
- NOTZ, D. & J. MAROTZKE (2012), Observations reveal external driver for Arctic sea-ice retreat, *Geophys. Res. Lett.*, 39, L08502, doi:10.1029/2012GL051094.
- WEEKS, W. F. (2010): *On Sea Ice*, University of Alaska Press, 663 S.

Kontakt:

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