

2.5 Meereis in der Arktis und Antarktis

DIRK NOTZ

Arctic and Antarctic Sea-ice: Sea ice is one of the key indicators of climatic change. However, it also plays a very active role in setting global climate conditions, both through its impact on the energy balance because of its high albedo and through its impact on the global ocean circulation because of its salt release. While sea ice in the Antarctic has been increasing slightly over the last years, Arctic sea-ice extent has decreased significantly. These different responses are in particular a result of the different oceanic settings in both regions. For the future, Arctic sea ice will probably continue to directly reflect current climate conditions; hence, any measure that is taken to slow down global warming will lead to a corresponding response of the Arctic sea-ice cover.

Bei der Diskussion um mögliche Auswirkungen des globalen Klimawandels auf die Weltmeere wird häufig eine Erscheinungsform von Ozeanwasser hervorgehoben, die nur ein verschwindend geringer Bruchteil der Weltbevölkerung jemals zu Gesicht bekommen hat: das Meereis. Wie eine gigantische weiße Landmasse liegt es als dünne Schicht auf großen Teilen der polaren Meeresregionen und verändert durch sein Vorhandensein das globale Klima weit über diese Regionen hinaus. Warum Meereis eine solch entscheidende Rolle für das heutige Klima der Erde spielt und welche Konsequenzen sein möglicher Rückgang in einem wärmeren Klima nach sich ziehen könnte, wird auf den folgenden Seiten näher behandelt. Eine zentrale Rolle wird dabei insbesondere die Frage spielen, ob sich der bisher insbesondere im Sommer beobachtete Rückgang des Meereises in der Arktis noch wird stoppen lassen - oder ob jene seltsame Erscheinungsform von Ozeanwasser in Zukunft immer weiter verschwinden und dadurch normalem Wasser Platz machen wird.

Bildung, Wachsen und Schmelzen von Meereis

Hauptvoraussetzung für die Bildung von Meereis in einer bestimmten Ozeanregion ist das Vorherrschen von sehr kalten Lufttemperaturen über einen längeren Zeitraum hinweg. Hierdurch wird dem offenen Wasser Wärme entzogen, sodass seine Temperatur immer weiter absinkt und schließlich den Gefrierpunkt des Wassers erreicht. Aufgrund des Salzgehalts von Meerwasser liegt dieser Gefrierpunkt unterhalb von 0°C , sodass Meerwasser in der relativ salzarmen Ostsee bei etwa -0.5°C gefriert, wohingegen der Gefrierpunkt des deutlich salzigeren Meerwassers in den Polarregionen bei etwa -1.8°C liegt.

Wenn das Meer so viel Wärme an die kältere Luft abgegeben hat, dass seine Temperatur auf den Gefrierpunkt abgesunken ist, führt jeder weitere Wärmeentzug zur Bildung von kleinen Eiskristallen. Im Laufe der Zeit bilden sich immer mehr dieser einzelnen Eiskristalle, die schließlich zusammenfrieren und eine ge-

schlossene Eisdecke bilden. Das im Meerwasser enthaltene Salz kann dabei nicht in das Kristallgitter des Eises eingebaut werden, sondern wird im Meereis in kleinen Kanälen und Kammern in Form einer flüssigen, salzigen Lake konzentriert. Meereis ist also kein reiner Festkörper, sondern es besteht aus reinen Süßwasserkristallen, zwischen denen die sehr salzige, flüssige Lake eingebettet ist.

Hat sich in einer bestimmten Ozeanregion eine geschlossene Eisdecke gebildet, so wird diese im Laufe der Zeit an ihrer Unterseite durch das Gefrieren von Meerwasser weiter wachsen, solange von dieser Unterseite eine hinreichende Menge an Wärme abgeführt werden kann. Dieses Abführen von Wärme geschieht dabei durch Wärmeleitung, die die Wärme von der Eisunterseite durch das Eis hindurch zur kalten Atmosphäre transportiert. Je dicker das Eis wird, umso ineffizienter wird diese Wärmeleitung durch das Eis, sodass die Wachstumsgeschwindigkeit des Eises immer weiter abnimmt. Im Laufe eines einzelnen Winters kann sich daher in der Arktis nur Eis mit einer maximalen Dicke von etwas 2 Metern bilden, in der Antarktis teilweise auch etwas dicker.

Zum Ende des Winters steigen die Lufttemperaturen in den Polargebieten langsam wieder an, die Bildung von neuem Eis wird daher immer langsamer, bis schließlich mit dem Beginn der Schmelzperiode die Eisdicke anfängt abzunehmen. Für dieses Dünnerwerden des Eises sind primär zwei Prozesse verantwortlich: Zum einen kann bei Lufttemperaturen oberhalb des Gefrierpunktes Eis an der Oberfläche des Meereises schmelzen, das entstehende Schmelzwasser läuft entweder durch das poröse Meereis hindurch oder über den Rand einzelner Eisschollen ins Meer – das Meereis wird von oben her dünner. Zum anderen kehrt sich die Richtung der Wärmeleitung durch das Eis um sobald die Atmosphäre wärmer geworden ist als das Meerwasser unter dem Eis. Ab diesem Zeitpunkt wird Wärme von der Eisoberfläche an die Eisunterseite transportiert und führt dort ebenfalls zu einem Abschmelzen des Eises. Verstärkt wird dieser Prozess durch die langsam steigende Temperatur des Meerwassers, das seinerseits

Wärme ans Meereis abgibt. Während in der Arktis im letzten Jahrhundert das Oberflächenschmelzen eindeutig der dominierende Schmelzprozess war, zeigen Messungen der letzten Jahre einen immer weiter zunehmenden Anteil von Eisschmelzen an der Eisunterseite. In der Antarktis ist aufgrund der niedrigeren Lufttemperaturen schon seit jeher das Abschmelzen an der Unterseite der Hauptfaktor für das dortige Abschmelzen des Meereises, insbesondere wenn das Eis durch nordwärts gerichtete Winde und Meeresströmungen in Gebiete mit vergleichsweise warmem Wasser transportiert worden ist.

Die Rolle von Meereis im Klimasystem

Die Tatsache, dass Meereis kein reiner Festkörper ist, spielt aus vielen Gründen eine entscheidende Rolle für das Klimasystem der Erde. Aufgrund der im Eis befindlichen Salzlake befinden sich im Innern von Meereis eine Vielzahl von Phasengrenzen, die einfallendes Licht in unterschiedliche Richtungen streuen. Meereis ist daher nicht durchsichtig, sondern hat ein sehr hohes Reflektionsvermögen (Albedo): Während Meerwasser je nach Winkel des einfallenden Sonnenlichtes nur etwa 4–7 % des Lichts reflektiert, werden von Meereis gewöhnlich weit mehr als 60 % des einfallenden Lichts reflektiert; liegt Neuschnee auf dem Eis steigt diese Zahl teilweise auf 90 % an. Meereis wirkt daher wie ein gewaltiger Spiegel, der Sonnenlicht ins Weltall zurückreflektiert und damit sehr effizient zur Kühlung der Polarregionen beiträgt.

Die im Meereis enthaltene Salzlake ist auch von entscheidender Bedeutung für den Wärmeaustausch zwischen Ozean und Atmosphäre in den Polarregionen. Meereis bildet nämlich eine äußerst effektive Isolationschicht, die im Winter den Ozean von der deutlich kälteren Atmosphäre isoliert hält. Nur durch Wärmeleitung von der Unterseite des Eises zu dessen Oberseite kann noch ein kleiner Wärmeaustausch zwischen Ozean und Atmosphäre stattfinden, der aufgrund der geringen Wärmeleitfähigkeit der Salzlake umso schwächer ist, je mehr Salzlake im Eis vorhanden ist.

Da die Salzlake im Meereis einen deutlich höheren Salzgehalt hat und damit schwerer ist als Meerwasser, läuft im Laufe der Zeit immer mehr Salzlake aus dem Eis heraus und gelangt in den darunter liegenden Ozean. Die Menge des im Eis befindlichen Salzes nimmt daher immer weiter ab, der darunter liegende Ozean wird immer salziger. Schmilzt das Meereis im Sommer, so hat das entstehende Schmelzwasser einen deutlich niedrigeren Salzgehalt als Meerwasser, sodass es sich an der Oberfläche des Ozeans sammelt. Dieser an einen Destillationsvorgang erinnernde Prozess ist ebenfalls

von zentraler Bedeutung für die Rolle von Meereis im Klimasystem: Modellsimulationen haben gezeigt, dass der Salzausstoß aus Meereis erheblich zur Bildung von sogenanntem ozeanischen Tiefenwasser beiträgt, das mit seiner hohen Dichte den Großteil der Wassermenge in den Tiefen der globalen Ozeane ausmacht (STÖSSEL et al. 2002).

Auch der nördliche Ausläufer des Golfstroms, der sogenannte Nordatlantikstrom, könnte durch Meereis beeinflusst werden: Angetrieben wird dieser Meeresstrom, der große Mengen an Wärme nach Westeuropa transportiert, durch das Absinken von kaltem Oberflächenwasser östlich von Grönland. Grundvoraussetzung für dieses Absinken ist dabei die hohe Dichte des Oberflächenwassers, die durch dessen niedrige Temperatur und recht hohen Salzgehalt verursacht wird. Gelangen größere Mengen von vergleichsweise salzarmem Schmelzwasser von Meereis in die Absinkregion, so sammelt sich dieses Wasser an der Oberfläche, die Dichte des Oberflächenwassers nimmt daher ab und das Absinken wird schwächer. Das Schmelzen großer Mengen von Meereis und der Export dieses Schmelzwassers könnten daher einen direkten Einfluss auf den Antrieb und damit auf die Stärke des Nordatlantikstroms und die nach Westeuropa transportierte Wärme haben.

Auch die atmosphärische Zirkulation wird direkt durch das Vorhandensein von Meereis beeinflusst. Modellstudien deuten daraufhin, dass sich durch den Rückgang des Meereises in der Arktis die vorherrschenden Zirkulationsmuster in der Atmosphäre derartig verschieben, dass es im Winter zu häufigeren Kaltluftausbrüchen aus der Arktis in Richtung Europa kommen kann. Der Rückgang des Meereises in der Arktis würde damit möglicherweise zu einer Zunahme an kalten Wintertagen in Mitteleuropa führen. Als Kehrseite der Medaille führen diese Kaltluftausbrüche zu einer deutlichen Erwärmung der Arktis, das Meereis könnte dort daher noch schneller zurückgehen als prognostiziert.

Schließlich gilt Meereis auch als wichtiger Frühindikator für eine mögliche Klimaveränderung. Die Ausdehnung und die Dicke von Meereis hängt von einer Vielzahl von Klimavariablen, wie z.B. vorherrschenden Temperaturen und Winden, ab. Der Zustand von Meereis zu einem bestimmten Zeitpunkt hängt direkt von dem Zustand dieser Klimavariablen in den vorangegangenen Jahren ab, so dass Meereis zu jedem beliebigen Zeitpunkt Veränderungen in seinen Antriebsvariablen über mehrere Jahre hinweg abbildet. Aufgrund seiner relativ geringen Dicke reagiert Meereis dabei recht schnell auf Veränderungen dieser Klimavariablen und visualisiert damit gleichsam mittel- und langfristige Änderungen im Klimasystem.

Beobachtete Veränderungen

Aufgrund der wichtigen Rolle von Meereis für den Energiehaushalt des Erdklimas gelten großskalige Veränderungen in der Ausdehnung und in der Dicke von Meereis sowohl als Anzeichen für eine globale Klimaveränderung als auch als Antrieb für eine solche Klimaveränderung. Insbesondere der starke Rückgang des sommerlichen Meereises in der Arktis hat dabei in den letzten Jahren sowohl in der Wissenschaft als auch in der breiten Öffentlichkeit verstärkt die Frage aufgeworfen, wie solche Veränderungen zu bewerten sind, welche Entwicklung für die Zukunft zu erwarten ist und welche Konsequenzen der beobachtete Rückgang des Meereises in der Arktis haben könnte.

Zur Beantwortung dieser Fragen sind zuverlässige Messdaten zur Ausdehnung von Meereis unabdingbar. Seit den 1970er Jahren wird diese Ausdehnung kontinuierlich von Satelliten aus vermessen, wobei das Messverfahren auf der Messung von Mikrowellenstrahlen beruht, die eine deutliche Unterscheidung von offenem Wasser und Meereis auch bei vollständig bewölktem Himmel zulassen. Zusätzlich gibt es seit Mitte der 1950er Jahre noch relativ zuverlässige Messdaten zur Meereisausdehnung, die von Schiffen und Flugzeugen aus gewonnen worden sind. Eine Zusammenstellung dieser beiden Datensätze erlaubt eine ungefähre Abschätzung der arktischen Meereisausdehnung für die

letzten sechs Jahrzehnte (Abb. 2.5-1). Die Messdaten zeigen deutlich, wie sehr das Meereis in der Arktis in den letzten Jahren zurückgegangen ist: Lag die mittlere Ausdehnung von Meereis in der Arktis im Sommer in den 1950er und 1960er Jahren noch bei etwa 8 Mio. km², so ist sie in den letzten Jahren auf teilweise unter 5 Mio. km² zurückgegangen. Insbesondere die Rekordminima im Jahr 2007 mit einer Eisbedeckung von knapp über 4 Mio km² und im Jahr 2012 mit einer Eisbedeckung von nur noch 3,4 Mio km² hat breites öffentliches Interesse geweckt. Im Vergleich zu den 1950er Jahren ist das Meereis in der Arktis also auf weniger als die Hälfte seiner ursprünglichen Ausdehnung zurückgegangen.

Bei der Einordnung dieser Veränderungen wird teilweise angemerkt, dass das arktische Klimasystem aufgrund von zahlreichen Rückkopplungsmechanismen starken natürlichen Schwankungen unterliegt, die auch ohne jeglichen menschlichen Einfluss zu starken Schwankungen in der Meereisausdehnung führen können. Eine statistische Analyse dieser Schwankungen macht allerdings deutlich, dass zumindest die seit 2007 beobachteten Sommerminima der Meereisausdehnung mit extrem hoher Wahrscheinlichkeit nicht ohne einen menschlichen Einfluss zu erklären sind (Abb. 2.5-2): Zu weit liegt die beobachtete Ausdehnung außerhalb der von Klimamodellen simulierten und in den 1950er und 1960er Jahren gemessenen natürlichen Schwan-

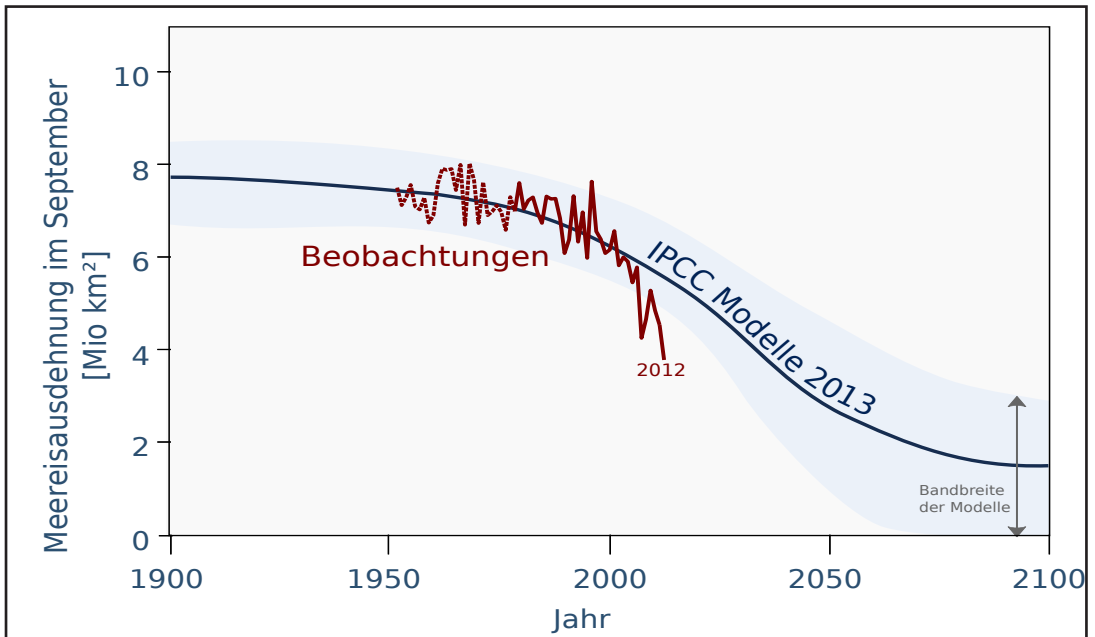


Abb.2.5-1: Beobachtete Entwicklung der Meereisausdehnung im September in der Arktis im Vergleich mit Modellsimulationen. Die rote Kurve zeigt den Verlauf der Messdaten, wobei die als gestrichelt dargestellten Daten aus Schiffs- und Flugzeugbeobachtungen stammen. Ab 1979 stammen die Daten aus Satellitenmessungen. Die blaue Fläche stellt die Bandbreite der Modellsimulationen aus dem 2013 erschienenen IPCC-Weltklimareport dar.

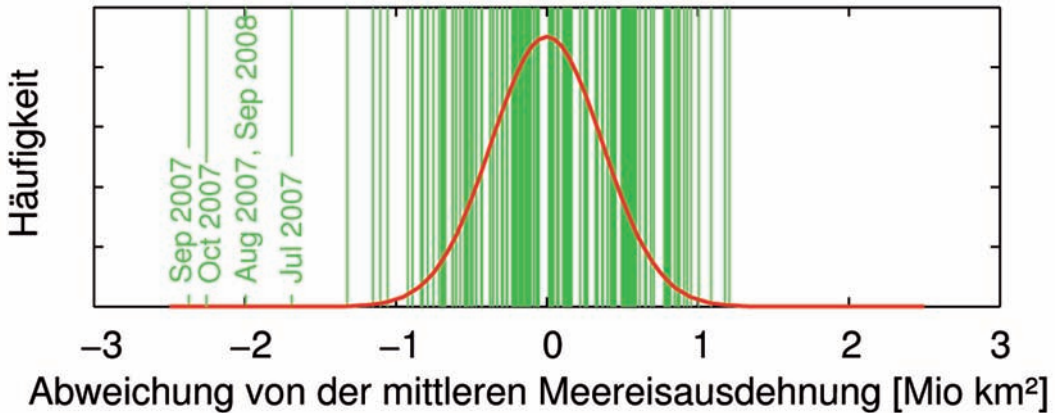


Abb.2.5-2: Beobachtete Abweichung der Meereisausdehnung vom langjährigen Mittel. Die rote Glockenkurve gibt die Verteilung der Abweichung der Meereisausdehnung vom langjährigen Mittel sowohl in einer Modellsimulation des vorindustriellen Klimas, als auch jene der Messdaten im Zeitraum 1953–1978 an. Die einzelnen Linien stellen die Abweichung der Meereisausdehnung vom langjährigen Mittel in den Sommermonaten der Jahre 1979–2009 dar.

kungsbreite der Meereisausdehnung. Es kann daher als nahezu sicher gelten, dass die in den letzten Jahren beobachteten Minima nur durch den menschlichen Einfluss auf das globale Klimasystem zu erklären sind.

In der Antarktis unterscheidet sich die Entwicklung des Meereises in den letzten Jahrzehnten deutlich von jener in der Arktis: die Meereisausdehnung im südlichen Ozean ist in den letzten Jahren weitestgehend konstant geblieben, es ist sogar eine leichte, statistisch nicht signifikante Zunahme der Meereisausdehnung gemessen worden. Diese Tatsache wird immer wieder als Beleg dafür gewertet, dass die globale Klimaerwärmung in Wirklichkeit gar nicht existiert. In den letzten Jahren haben allerdings eine Reihe von wissenschaftlichen Arbeiten gezeigt, dass die Ausdehnung des Antarktischen Meereises ebenfalls vom Menschen verursacht sein könnte, wobei zwei unterschiedliche Faktoren in Betracht gezogen werden müssen: Zum einen schmilzt das Meereis in der Antarktis in erster Linie dadurch, dass Wärme aus tieferliegenden warmen Wasserschichten in die kalte Oberflächenschicht des Ozeans gelangt und dort zum Schmelzen des Eis führt. Damit dieser Mechanismus möglichst effizient arbeiten kann, sollte der Dichteunterschied zwischen der oberflächennahen Wassermasse und den tieferen Wassermassen möglichst gering sein, so dass die tiefen Wassermassen durch Konvektion an die Oberfläche gelangen können. In den letzten Jahrzehnten hat gemäß Modellstudien die Dichte des oberflächennahen Wassers vergleichsweise stark abgenommen, wodurch der Dichteunterschied zum tieferliegenden Wasser angestiegen ist. Grund für diese Abnahme der Dichte der

oberflächennahen Wassermassen ist zum einen, dass aufgrund gesteigerter Wasser- und Lufttemperaturen das gebildete Meereis dünner geblieben ist und daher weniger Salz ins Meerwasser abgegeben hat. Darüber hinaus haben die Niederschläge im südlichen Ozean in den letzten Jahren aufgrund der wärmeren Luft zugenommen, was ebenfalls zu einer Abnahme der Dichte des Oberflächenwassers geführt hat. Da also das Oberflächenwasser in den letzten Jahren eine deutlich geringere Dichte hat als die tieferen Wassermassen, nimmt die Effizienz des Wärmetransports aus tieferen Schichten zur Oberfläche hin ab, die Ausdehnung des Eises kann also zunehmen (ZHANG 2007).

Ein zweiter Faktor, der die Zunahme des antarktischen Meereises erklären könnte, hängt mit dem Ozonloch zusammen. Aufgrund der niedrigen Ozonkonzentration in der oberen Atmosphäre besteht die Möglichkeit, dass sich die vorherrschenden oberflächennahen Winde in der Antarktis verstärken. Hierdurch würde das Meereis um den antarktischen Kontinent herum verstärkt von der Küste weggetrieben, so dass sich in Küstennähe offene Wasserflächen (sogenannte Polynyen) bilden können. Da in diesen Gebieten mit offenem Wasser sehr viel Wärme an die von den ablandigen Winden transportierte kalte Luft aus dem Innern der Antarktis abgegeben wird, kann dort sehr effizient neues Eis gebildet werden, was ebenfalls zu einer Zunahme des Meereises in der Antarktis beitragen kann. Inwiefern dieser Prozess tatsächlich zur Zunahme des antarktischen Meereises beiträgt, bleibt allerdings unklar: Während manche Studien einen solchen Zusammenhang aus Modellsimulationen ablei-

ten (z.B. TURNER et al. 2009), deuten andere Arbeiten daraufhin, dass ein solcher Zusammenhang zwischen Ozonloch und Meereisausdehnung unwahrscheinlich ist (SIGMOND & FYFE 2010).

Als dritter Faktor für die Zunahme von antarktischem Eis gilt schließlich, dass durch die Zunahme von Schneefall auf bereits vorhandenes Eis dieses Eis soweit unter Wasser gedrückt wird, dass auch die unteren Schneeschichten unter die Meeresoberfläche absinken. Seitlich einströmendes Wasser gefriert dann in diesen unteren Schneeschichten, es bildet sich sogenanntes Schneeeis, das zur Zunahme der Eisdicke beiträgt.

Durch die Kombination dieser Faktoren kann die Ausdehnung des Eises in der Antarktis zunehmen, obwohl sich sowohl der südliche Ozean als auch die darüberliegende Luft in den vergangenen Jahrzehnten in manchen Regionen ebenso stark erwärmt hat wie der Arktische Ozean.

Mögliche Zukunft

Die im letzten Abschnitt beschriebenen unterschiedlichen Auswirkungen, die der menschengemachte Klimawandel auf das Meereis in der Arktis und in der Antarktis hat, lässt auch für die Zukunft eine deutlich unterschiedliche Entwicklung von Meereis in den beiden Polarregionen erwarten. Während die meisten Klimamodelle für die nächsten Jahrzehnte in der Antarktis nur eine relativ langsame Abnahme der Meereisausdehnung prognostizieren, wird für die Arktis von einem deutlich stärkeren Rückgang des Meereises ausgegangen. Wenn keine einschneidenden Maßnahmen zum Klimaschutz getroffen werden, ist gemäß heutigem Kenntnisstand davon auszugehen, dass der arktische Ozean schon in wenigen Jahrzehnten im Sommer komplett eisfrei sein könnte.

Eine wichtige Rolle sowohl bei der Analyse der beobachteten bisherigen als auch bei der Abschätzung der möglichen zukünftigen Entwicklung von Meereis spielen dabei eine Reihe von sogenannten Rückkopplungsmechanismen, die einen einmal begonnenen Rückgang des Eises entweder verstärken oder abschwächen können. Der wohl bekannteste dieser Mechanismen, die sogenannte Eis-Albedo-Rückkopplung, hängt mit dem hohen Reflektionsvermögen (Albedo) von Meereis zusammen: Zieht sich in einer bestimmten Region das Meereis zurück, so bildet sich dort offenes Wasser. Da dieses Wasser im Gegensatz zum Meereis den Großteil des einfallenden Sonnenlichts absorbiert, erwärmt es sich im Sommer. Hierdurch wird weiteres Eis abgeschmolzen und noch mehr offenes Wasser gebildet, sodass noch weniger Sonnenlicht reflektiert wird (*Abb.*

2.5-3, links). Aufgrund dieser Eis-Albedo-Rückkopplung könnte sich ein einmal begonnener Rückgang von Meereis selbst verstärken, sodass er möglicherweise auch dann nicht mehr aufzuhalten wäre, wenn sich das globale Klima wieder abkühlte. Da ein solches sogenanntes »Kippen« des Meereises von großer Bedeutung für seine zukünftige Entwicklung und für die Effizienz möglicher Klimaschutzmaßnahmen wäre, wurde in den letzten Jahren relativ viel Forschung zu diesem Themenkomplex betrieben (EISENMAN & WETTLAUER 2009, NOTZ 2009).

Als vorläufiges Ergebnis dieser Arbeiten hat sich herausgestellt, dass zwar die Eis-Albedo-Rückkopplung isoliert betrachtet zu einem sich selbst verstärkenden Eisverlust führen könnte, dass aber andererseits eine Reihe von entgegengesetzt wirkenden Rückkopplungsmechanismen existieren, die ein unumkehrbares »Kippen« des arktischen Meereises zumindest in Bezug auf den Verlust des sommerlichen Meereises verhindern (*Abb.* 2.5-3, rechts). Der wohl wichtigste dieser Mechanismen hängt damit zusammen, dass nach einem sommerlichen Rückgang von Meereis in einer bestimmten Ozeanregion aus dem gebildeten offenen Wasser im Winter deutlich mehr Wärme an die Atmosphäre abgegeben werden kann, als in eisbedeckten Regionen des Ozeans. Hierdurch kühlen sich eisfreie Gebiete des Ozeans nach einem regionalen Meereisrückgang im Winter sehr effizient ab, so dass sich dort deutlich mehr neues Eis bilden kann als in einem Jahr mit einer größeren sommerlichen Eisausdehnung. Dieses neue Eis kann im Laufe eines Winters sogar dicker werden, als das Eis, das den Sommer überstanden hat. Grund hierfür ist zum einen die Tatsache, dass dünnes Eis deutlich schneller wächst als dickes Eis, weil dem Ozean durch das dünne Eis hindurch größere Mengen an Wärme entzogen werden können. Zum anderen bleibt aufgrund der recht späten Eisbildung normalerweise die Schneedecke auf dem neu gebildeten Eis dünner als jene auf Eis, das den Sommer überstanden hat. Da Schnee ein sehr guter Isolator ist, kann Eis mit einer dünnen Schneedecke schneller wachsen, als Eis mit einer dickeren Schneedecke. Dies ist ein weiterer Grund dafür, dass sich das Eis nach einem starken Rückgang in einem bestimmten Sommer im folgenden Winter normalerweise wieder etwas erholen kann.

Die Tatsache, dass sich der Rückgang von Meereis vermutlich zumindest im Sommer nicht selbst verstärkt, bedeutet, dass der Zustand des Meereises primär die aktuelle Klimasituation widerspiegelt. Hieraus lässt sich schließen, dass jede Maßnahme, die zur Verlangsamung des Klimawandels getroffen wird, auch direkt zur Verlangsamung des Rückgangs von arktischem Meereis führt. Sollen auch zukünftige Generationen im

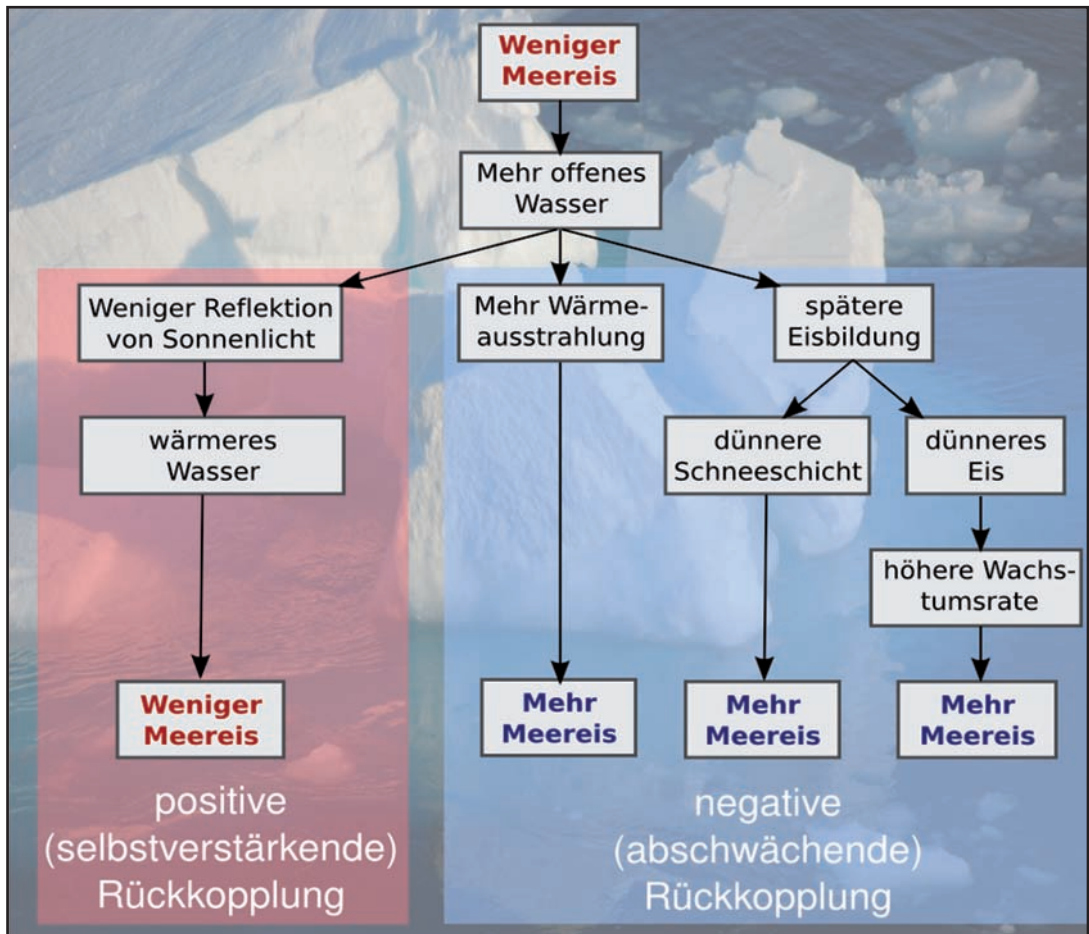


Abb.2.5-3: Schematische Übersicht über verschiedene Rückkopplungen nach einem Rückgang von Meereis. Die sogenannte Eis-Albedo-Rückkopplung, die zu einer Verstärkung eines einmal begonnenen Eisrückgangs und damit zu einem möglichen „Kippen“ führen kann, ist im linken Teil der Abbildung dargestellt. Im rechten Teil der Abbildung sind Prozesse dargestellt, die ein solches Kippen verhindern können.

Sommer noch Meereis in der Arktis vorfinden, müssen allerdings schnell einschneidende Maßnahmen zum Klimaschutz getroffen werden. Ansonsten wird der Arktische Ozean aller Voraussicht nach in wenigen Jahrzehnten im Sommer ein Meer sein wie jedes andere auch, die seltsame Erscheinungsform »Meereis« würde immer weiter vom Angesicht unseres Planeten verschwinden.

Literatur:

- EISENMAN I. & WETTTLAUER J.S. (2009): Nonlinear threshold behavior during the loss of Arctic sea ice. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 106:28–32
- NOTZ D. (2009): The future of ice sheets and sea ice: between reversible retreat and unstoppable loss, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 106(49), 20590-20595. doi: 10.1073/pnas.0902356106.
- SIGMOND M. & J. C. FYFE (2010): Has the ozone hole contributed to increased Antarctic sea ice ex-

tent?, *Geophys. Res. Lett.*, 37, L18502, doi:10.1029/2010GL044301.

STÖSSEL A., K. YANG & K. SEONG-JOONG (2002): On the Role of Sea Ice and Convection in a Global Ocean Model. *J. Phys. Oceanogr.*, 32, 1194–1208.

TURNER J., J. C. COMISO, G. J. MARSHALL, T. A. LACHLAN-COPE, T. BRACEGIRDLE, T. MAKSYM, M. P. MEREDITH, Z. WANG & A. ORR (2009): Non-annular atmospheric circulation change induced by stratospheric ozone depletion and its role in the recent increase of Antarctic sea ice extent, *Geophys. Res. Lett.*, 36, L08502, doi:10.1029/2009GL037524.

ZHANG J. (2007): Increasing Antarctic sea ice under warming atmospheric and oceanic conditions, *J. Climate*, 20, 2515–2529, doi: 10.1175/JCLI136.1.

Dr. Dirk Notz
Max Planck Institut für Meteorologie
Bundesstr. 53 - 20146 Hamburg
dirk.notz@zmaw.de