

## Das große Schmelzen: Meereis im Klimawandel

### The big melt: sea ice in a changing climate

Notz, Dirk

Max-Planck-Institut für Meteorologie, Hamburg

Korrespondierender Autor

E-Mail: [dirk.notz@zmaw.de](mailto:dirk.notz@zmaw.de)

---

#### Zusammenfassung

Das arktische Meereis gibt der Wissenschaft zurzeit einige Rätsel auf: Nach einem unerwartet starken Rückgang im Sommer 2007 hat sich die eisbedeckte Fläche 2008 und 2009 wieder etwas erholt. Wissenschaftler am MPI für Meteorologie untersuchen, wie dieses Auf und Ab zu erklären ist – und was die Ergebnisse für die zukünftige Entwicklung des Lebensraums von Eisbären und Robben erwarten lassen. Für ihre Arbeit benutzen die Wissenschaftler ausgefeilte Computermodelle, sind aber auch selbst in der Arktis vor Ort, um die physikalischen Eigenschaften von Meereis besser zu verstehen.

#### Summary

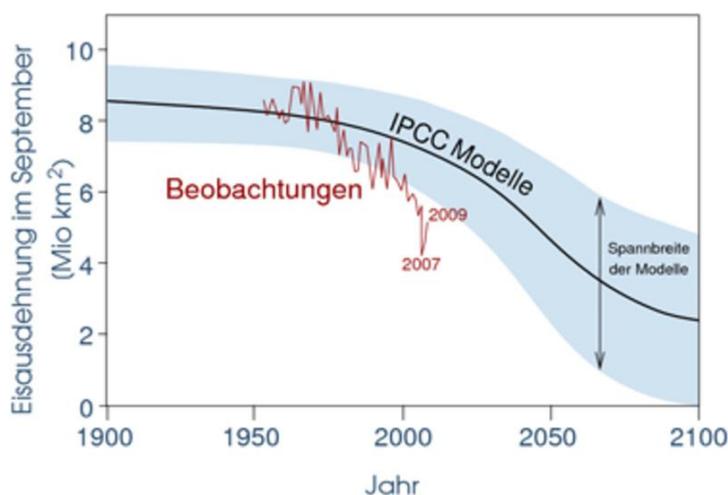
Scientists are currently puzzled by the behavior of Arctic sea ice: Following a sharp and unexpected decline in summer 2007, the ice-covered area has increased both in 2008 and in 2009. At MPI for Meteorology, scientists carry out research to understand these ups and downs. They also examine what their results mean for the future evolution of the polar bear's habitat. For their studies, the researchers use sophisticated computer models, but they also carry out field measurements in the Arctic to better understand the physical properties of sea ice.

#### Meereis: Ein Schlüsselement im arktischen Klimasystem

Im Rahmen des ersten Internationalen Polarjahres machte sich im Jahre 1881 unter Leitung von Leutnant Adolphus Greely eine US-amerikanische Polarexpedition auf den Weg, um auf der Ellesmere-Insel in Kanada eine Polarstation zu errichten. Diese Station sollte möglichst weit im Norden der Insel als Teil eines internationalen Netzwerkes zum besseren Verständnis des Klimasystems der Arktis beitragen. Es schien daher zunächst eine äußerst glückliche Fügung zu sein, dass die Expedition aufgrund einer ungewöhnlich geringen Ausdehnung von Meereis mit ihrem Schiff bis auf über 81°N vordringen und dort am Ufer der Lady-Franklin-Bucht die geplante Forschungsstation errichten konnte. Was als Erfolg begann, geriet jedoch nach der ersten Überwinterung immer mehr zum Desaster: In den folgenden Jahren dehnte sich das Meereis vor der Station unerwartet weit nach Süden aus, und es gelang trotz zahlreicher Versuche nicht, zu den Männern auf der Station vorzudringen. Die Unvorhersagbarkeit des Meereises, die zu gravierenden Änderungen der Schiffbarkeit in der Meerenge zwischen Grönland und Kanada führte, kostete damals einen Großteil der

Expeditionsteilnehmer das Leben.

126 Jahre später: Im Sommer 2007 geht die Ausdehnung des Meereises in der Arktis auf den niedrigsten Wert seit dem Beginn zuverlässiger Aufzeichnungen zurück (**Abb. 1**). Auch diese plötzliche Abnahme kam unerwartet, so gut wie niemand hatte vorhergesehen, dass das Meereis im Vergleich zu seinem bisherigen Tiefstwert im Sommer 2005 so rasch um mehr als das Vierfache der Fläche Deutschlands zurückgehen könnte. Viele Wissenschaftler erwarteten am Ende des Sommers 2007, dass sich dieser Trend fortsetzen und das Meereis auch in den unmittelbar folgenden Jahren rapide zurückgehen würde. Doch wieder einmal erwies sich das Meereis als schwer vorhersagbar: Entgegen den Erwartungen stieg die eisbedeckte Fläche in den Jahren 2008 und 2009 wieder an, das Meereis schien dem Erwärmungstrend in der Arktis noch einen gewissen Widerstand entgegenzusetzen zu können. Am Max-Planck-Institut für Meteorologie in Hamburg untersuchen Wissenschaftler derzeit, wie dieses Verhalten des Meereises zu erklären ist, welche Erkenntnisse sich aus den jüngsten Veränderungen ergeben und was diese Veränderungen möglicherweise für die Zukunft des Meereises bedeuten.



Meereisausdehnung in der Arktis zum Zeitpunkt des jährlichen Minimums. Die rote Linie stellt die beobachtete Entwicklung dar, die schwarze Linie den geglätteten Mittelwert der Modellsimulationen aus dem 2007 veröffentlichten IPCC-Weltklimareport [1]. Die blaue Fläche spiegelt die Schwankungsbreite der Modellsimulationen wider.  
© aktualisiert und vereinfacht nach [2]

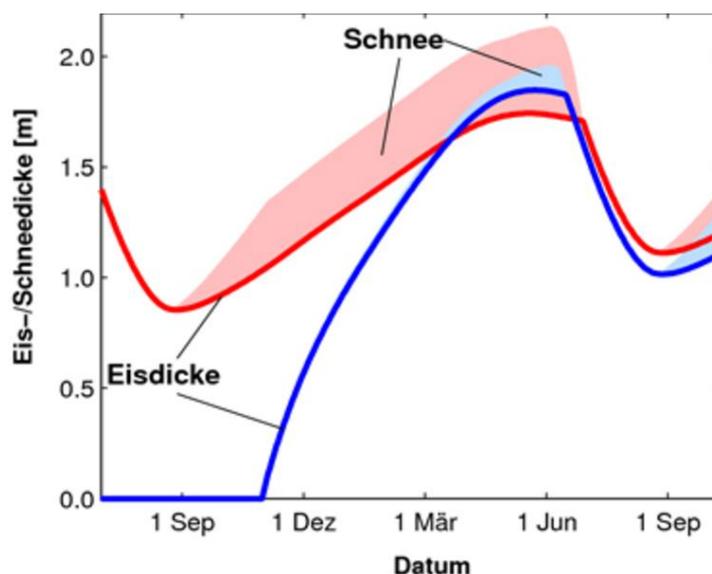
Die Gründe für dieses Interesse sind vielfältig: Zum einen gilt die Arktis als Frühwarnsystem des Klimasystems, mögliche Klimaveränderungen werden dort aller Voraussicht nach deutlich früher und deutlich stärker eintreten als in gemäßigteren Breiten. Das Meereis gilt daher als wichtiger Indikator für globale Klimaveränderungen. Zum anderen bildet das Meereis sowohl für das Klimasystem der Erde als auch für die in der Arktis lebenden Menschen und Tiere ein wichtiges Schlüsselement. Veränderungen im Meereis werden daher zu einschneidenden Folgen in vielen Bereichen führen: politisch und ökonomisch, weil aufgrund des zurückgehenden Meereises große Gebiete des Arktischen Ozeans zugänglich werden, in denen immense Rohstoffreserven vermutet werden; ökologisch, weil das Arktische Meereis den zentralen Lebensraum für eine Reihe von Tierarten wie die Ringelrobbe und den Eisbären bildet, die eine wichtige Rolle in der Arktischen Nahrungskette spielen; humanitär, weil der Lebensstil der Urbevölkerung in der Arktis in vielerlei Hinsicht auf das Vorhandensein von Meereis ausgerichtet ist; und klimatisch, weil Meereis zum Beispiel aufgrund seiner großen Fläche und seiner großen Helligkeit wie ein gewaltiger Sonnenlichtspiegel im Sommer einen Großteil des einfallenden Sonnenlichts direkt ins Weltall zurückreflektiert und damit die hohen Breiten der Nordhemisphäre effizient kühl hält.

## Von Sonnenlichtspiegeln zu negativen Rückkopplungen

Im Gegensatz zu dem Eis, das Grönland oder die Antarktis bedeckt, ist Meereis vergleichsweise dünn. Es reagiert daher relativ schnell auf Änderungen der Lufttemperaturen, was auch zum typischen Jahresgang der Meereisausdehnung führt: Im Sommer ist ein deutlich geringerer Teil des Arktischen Ozeans von Meereis bedeckt als im Winter. Es liegt daher auf der Hand, in einem wärmeren Klima einen Rückgang des arktischen Meereises zu erwarten – die Berechnungen der Klimamodelle für den jüngsten Weltklimareport gehen daher auch überwiegend davon aus, dass sich die Fläche des Meereises in der Arktis aufgrund der menschengemachten Klimaerwärmung im Laufe dieses Jahrhunderts so weit verringern wird, dass der Arktische Ozean im Sommer komplett eisfrei sein wird. Im letzten Weltklimareport wurde davon ausgegangen, dass dieser Zustand eher gegen Ende des Jahrhunderts erreicht sein dürfte – die meisten Wissenschaftler waren daher ähnlich überrascht wie die breite Öffentlichkeit, als plötzlich im Sommer 2007 die vom Meereis bedeckte Fläche weit unter den bisherigen Tiefstwert fiel (Abb. 1).

Mit diesem Rückgang des Arktischen Meereises war auch automatisch eine starke Verkleinerung des erwähnten Sonnenlichtspiegels verbunden: durch die Abnahme der von Eis bedeckten Fläche wurde weniger Sonnenlicht ins Weltall reflektiert, die Arktis erwärmte sich daher zusätzlich. Dieses Prinzip wird in der Wissenschaft als Eis-Albedo-Rückkopplung beschrieben, wobei „Albedo“ nichts anderes bedeutet als „Reflektionsvermögen“. Im Rahmen dieser Rückkopplung führt eine kleinere Meereisfläche zu geringerer Reflektion von Sonnenlicht, damit zu einer wärmeren Arktis, damit zu einer kleineren Eisfläche und so weiter. Nach dem extremen Rückgang des Meereises in der Arktis im Jahr 2007 schien es daher zunächst nicht unwahrscheinlich, dass sich der rapide Rückgang fortsetzen würde und das Arktische Meereis schon bald vollständig verschwunden sein könnte.

Ergebnisse von neuen Modellberechnungen am MPI für Meteorologie deuten jetzt darauf hin, dass das Meereis einem solchen raschen Abschmelzen möglicherweise noch für einige Zeit widerstehen kann. Grund hierfür ist ein Rückkopplungseffekt, der mit der Wachstumsgeschwindigkeit von Meereis zusammenhängt und der dem erwähnten Eis-Albedo-Rückkopplungseffekt entgegenwirkt (**Abb. 2**): In den meisten Gebieten des Arktischen Ozeans, die sich im Laufe des Sommers 2007 aufgrund des offenen Wassers überdurchschnittlich erwärmt hatten, begann aufgrund der niedrigen Lufttemperaturen im Laufe des darauffolgenden Winters neues Meereis zu wachsen. Dieses Meereis war anfänglich sehr dünn, weshalb es sehr schnell wachsen konnte. Meereis wird nämlich vor allem dadurch dicker, dass durch das Eis hindurch Wärme vom Ozean in die Atmosphäre transportiert wird, wodurch an der Unterseite des Eises Meerwasser gefriert. Bei dünnem Eis kann die darüberliegende kalte Atmosphäre deutlich mehr Wärme von der Eisunterseite ableiten als bei dickem Eis, sodass das dünne Eis nach dem Ende des Sommers 2007 anfänglich sehr schnell wachsen konnte. Dabei wurde im Laufe des Winters deutlich mehr Wärmeenergie vom Ozean an die Atmosphäre abgeführt, als dies beim Vorhandensein von dickerem Eis der Fall gewesen wäre. Dieser zusätzliche Wärmeeintrag wurde nach den Modellsimulationen der Wissenschaftler in erster Linie dadurch ausgeglichen, dass die Atmosphäre in einem solchen Szenario mehr Wärme ans Weltall abgibt. Die beim stärkeren Eiswachstum in die Atmosphäre gelangte Wärme führt daher nicht zwangsläufig zu einer signifikanten, langfristigen Erwärmung der Atmosphäre, sodass sich das Eis auch nach einem extremen Minimum wieder erholen kann.



Simulierte Entwicklung der Meereisdicke im Laufe eines Jahres. Die rote Linie stellt die Entwicklung der Dicke von Meereis dar, das den Sommer überstanden hat und Anfang September bei 80 cm Eisdicke anfängt, wieder dicker zu werden. Die blaue Linie gibt die Entwicklung von Meereis wieder, das sich am 1. November aus offenem Wasser bildet. Dieses Eis wächst, auch aufgrund der dünnen Schneedecke, anfänglich sehr schnell und wird im Laufe des Winters dicker als das Eis, das den Sommer überstanden hat (aus [3]).  
© Max-Planck-Institut für Meteorologie

Die Wissenschaftler untersuchten auch noch einen zweiten Mechanismus, der zu einer deutlichen Erholung einer stark reduzierten Meereisfläche führen kann. Dieser Mechanismus hängt mit dem Wechselspiel zwischen Schneefall und Eiswachstum zusammen: Schnee legt sich wie eine isolierende Decke auf vorhandenes Meereis und reduziert dadurch den Wärmetransport vom Ozean durch das Eis erheblich. In den Gebieten, die im Laufe des warmen Sommers 2007 eisfrei geworden waren, begann das Eiswachstum allerdings erst so spät, dass die Schneedecke auf dem Eis den gesamten Winter über sehr dünn blieb. Im Vergleich zu Eis, auf dem eine dicke Schneedecke liegt, konnte hierdurch Wärme effektiver von der Unterseite des Eises an die Atmosphäre abgeführt werden und das Eis deutlich schneller wachsen. Aufgrund dieser Mechanismen erholte sich die Ausdehnung des Meereises in der Arktis 2008 und 2009 wieder ein wenig, das Szenario eines raschen, unwiderruflichen Rückgangs von Meereis scheint daher zurzeit eher unwahrscheinlich zu sein.

### Kein Grund zur Entwarnung

Nichtsdestotrotz ist das Meereis, das heute den Arktischen Ozean bedeckt, kaum noch mit jenem Eis vergleichbar, das noch vor zwanzig Jahren in der Arktis zu finden war: Früher bestand der weitaus größte Teil des Arktischen Meereises aus sogenanntem mehrjährigem Eis. Dieses Eis kreiste viele Jahre im arktischen Ozean und wurde im Sommer nur ein wenig dünner, ohne komplett wegzuschmelzen. Heute bildet sogenanntes einjähriges Eis den Großteil des Eises in der Arktis. Dieses einjährige Eis bildet sich im Laufe des Winters im offenen Wasser und schmilzt im darauffolgenden Sommer wieder vollständig ab. Bisher sind die Eigenschaften dieses dünnen, einjährigen Eises nur unzureichend verstanden, was zu möglichen Fehlern bei der Prognose der zukünftigen Entwicklung des arktischen Meereises führt. Im Rahmen von Feldexperimenten untersuchen die Wissenschaftler des MPI für Meteorologie daher, inwiefern sich das einjährige Eis von mehrjährigem Eis unterscheidet (**Abb. 3**).

Erste Ergebnisse deuten daraufhin, dass dieses dünne, einjährige Eis deutlich empfindlicher auf ein sich erwärmendes Klima reagiert als das massive, dicke Eis, das früher die Arktis bedeckt hatte. Grund hierfür ist unter anderem, dass der Salzgehalt in dünnem Eis sehr viel höher liegt als in dickem Eis. Dieses Salz ist im Meereis in Form von flüssiger Salzlake eingelagert. Der große Anteil von Salzlake führt beim einjährigen Eis dazu, dass weniger Wärmeenergie notwendig ist, um das Eis zum Schmelzen zu bringen. Die Tatsache, dass sich das Meereis nach dem Minimum im Jahr 2007 in den darauffolgenden Wintern wieder etwas erholen konnte, ist also kein Grund zur Entwarnung in Bezug auf die zukünftige Entwicklung von Meereis: Wenn die menschengemachte Klimaerwärmung, die in den letzten Jahren zu einer weit überdurchschnittlichen Erwärmung der Arktis geführt hat, nicht deutlich verlangsamt und schließlich ganz gestoppt wird, wird die von Meereis bedeckte Fläche immer weiter abnehmen, bis der Arktische Ozean im Sommer komplett eisfrei sein wird.

Wie schnell das Meereis in der Arktis tatsächlich verschwinden wird, ist aber nach wie vor ähnlich schwer vorherzusagen wie die Entwicklung des Meereises im Rahmen der Greely-Expedition im Jahr 1881. Nach wie vor wissen wir zu wenig über die interne Struktur von Meereis, wir wissen zu wenig über seine Wechselwirkung mit der Atmosphäre und dem Ozean, zu wenig über die zukünftige Entwicklung von Treibhausgasemissionen durch den Menschen. Um Antworten auf die offenen Fragen zu finden, werden sich daher auch in den nächsten Jahren Wissenschaftler des MPI für Meteorologie auf den Weg in die Arktis machen, um das Arktische Meereis besser zu verstehen. Diese Erkenntnisse werden anschließend dafür genutzt, die am MPI für Meteorologie entwickelten Klimamodelle zu verbessern und schließlich herauszufinden, ob trotz allem Pessimismus das Unwahrscheinliche doch noch eintreffen kann: Dass es Ende dieses Jahrhunderts auch im Sommer noch Meereis in der Arktis geben wird.



Eine schwimmende Messboje, mit der die Wissenschaftler das Wachsen und die Eigenschaften von dünnem, einjährigem Meereis untersuchen.

© Martin Varga

## Originalveröffentlichungen



[Nach](#) [Erweiterungen](#) [suchen](#)[Bilder](#)[erweiterung](#)[Channel](#)[ticker](#)[Datei](#)[liste](#)[HTML-](#)[Erweiterung](#)[Job](#)[ticker](#)[Kalender](#)[erweiterung](#)[Linker](#)[erweiterung](#)[MPG.PuRe-Referenz](#)[Mitarbeiter](#) (Employee [Editor](#))[Personen](#)[erweiterung](#)[Publikation](#)[erweiterung](#)[Teaser](#) [mit](#) [Bild](#)[Text](#)[blocker](#)[erweiterung](#)[Veranstaltung](#)[sticker](#)[erweiterung](#)[Video](#)[erweiterung](#)[Video](#)[listen](#)[erweiterung](#)[YouTube-](#)[Erweiterung](#)

[1] **S. Solomon et al. (Eds):**

***The Physical Science Basis.***

Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, UK (2007).

[2] **J. Stroeve, M. M. Holland, W. Meier, T. Scambos, M. Serreze:**

***Arctic sea ice decline: Faster than forecast.***

Geophysical Research Letters **34**, L09501, doi: 10.1029/2007GL029703 (2007).

[3] **D. Notz:**

***The future of ice sheets and sea ice: Between reversible retreat and unstoppable loss.***

Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America **106** (49), 20590-20595, doi: 10.1073/pnas.0902356106 (2009).