

Kann arktisches Meereis im Winter plötzlich verschwinden?

Sebastian Bathiany (Wageningen University & Research), Dirk Notz, Thorsten Mauritsen, Victor Brovkin und Gaby Raedel (Max-Planck-Institut für Meteorologie) haben in einer neuen Studie den Meereisverlust in der Arktis untersucht. Sie fanden heraus, dass ein abrupter Meereisverlust im Winter auch ohne Rückkopplungsprozesse stattfinden kann und die starke Anfälligkeit des Wintermeereises mit den Unterschieden von Abschmelzen und Gefrieren des Eises zusammenhängt. Sie haben sich zudem damit befasst, ob abrupte Eisverluste im Winter ein umkehrbares Phänomen sind und ob man sie mithilfe von Beobachtungsdaten vorhersehen könnte.

Der Verlust des arktischen Meereises ist eines der auffälligsten Anzeichen der fortschreitenden globalen Erwärmung. Insbesondere der schnelle Verlust des arktischen Meereises im Sommer hat große öffentliche Aufmerksamkeit erfahren und wird oft mit der Vorhersage in Verbindung gebracht, dass Mitte des Jahrhunderts der Sommer möglicherweise eisfrei sein könnte. Arktisches Meereis zieht sich allerdings nicht nur während des Sommers zurück, auch im Winter tritt beträchtlicher Eisverlust auf. Kürzlich wurde der Verlust dieses Wintermeereises durch eine Reihe von Monatsmitteln veranschaulicht, die ein Rekordminimum in der arktischen Eisbedeckung von Oktober 2016 bis Februar 2017 zeigen (siehe Abb. 1).

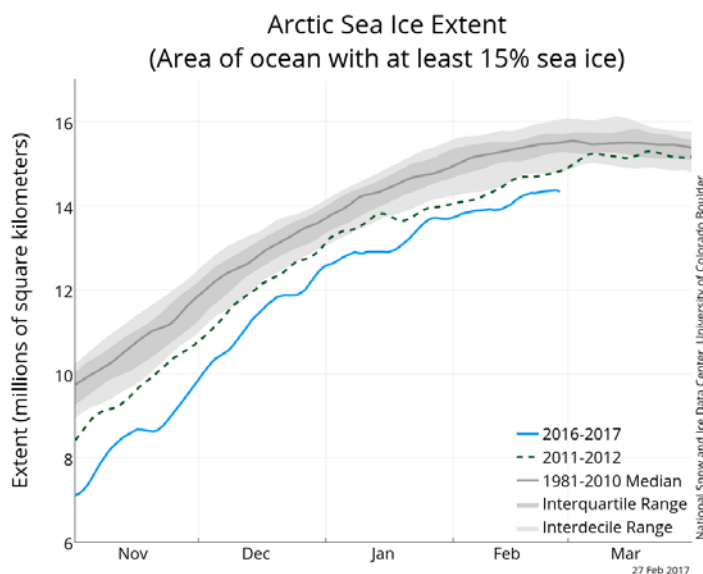


Abb. 1. Image courtesy of the National Snow and Ice Data Center, University of Colorado, Boulder.

Erreicht der Verlust des Meereises in der Arktis einen Kipp-Punkt?

Der beobachtete Verlust von arktischem Meereis in den vergangenen Jahrzehnten wirft die Frage auf, ob es einen sogenannten Kipp-Punkt gibt, einen Punkt, von dem aus es kein Zurück mehr gäbe und an dem das Meereis in großer Menge abrupt und unwiderruflich verschwinden würde. In einer neueren Studie im *Journal of Climate* haben sich Sebastian Bathiany, Dirk Notz, Thorsten Mauritsen, Victor Brovkin und Gaby Raedel dieser Frage angenommen. Im Gegensatz zu früheren Studien haben sie sich nicht nur auf ein einzelnes Modell verlassen, sondern eine ganze Hierarchie von Modellen

analysiert, von sehr einfachen thermodynamischen Meereismodellen bis zu komplexen Erdsystemmodellen des Coupled Model Intercomparison Projects (CMIP5).

Angetrieben mit stetig ansteigenden CO₂-Konzentrationen zeigen diese komplexen Modelle eine lineare Abnahme der Meereisbedeckung im Sommer, was mit den beobachteten Vorgängen in der realen Welt übereinstimmt. Nach dem kompletten Verlust des Meereises im Sommer bildet sich das Meereis dann weiterhin jeden Winter wieder neu, bis der arktische Winter zu warm wird. Dieser Übergang, von einer saisonal eisbedeckten Arktis zu einem dauerhaft eisfreien arktischen Ozean, erfolgt deutlich schneller als der vorhergehende Verlust des Meereises im Sommer. In einigen Klimamodellen kommt es zu einem sehr abrupten Verlust des Wintermeereises nach einer langen Zeit mit relativ wenigen Veränderungen. Im Erdsystemmodell des MPI-M (MPI-ESM) verschwindet dabei ein Eisgebiet von mehreren Millionen Quadratkilometern innerhalb weniger Jahre. Um ein ähnlich großes Gebiet an Sommermeereis zu schmelzen, wäre eine globale Erwärmung von zwei Grad erforderlich, und der Schmelzprozess würde Jahrzehnte dauern. Schaut man sich eine Animation über die Meereisbedeckung an, dann ist der Rückgang des Meereises im Winter nicht einfach nur eine Wiederholung des Rückgangs des Meereises im Sommer, sondern ein völlig anderer Ablauf (Abb. 2).

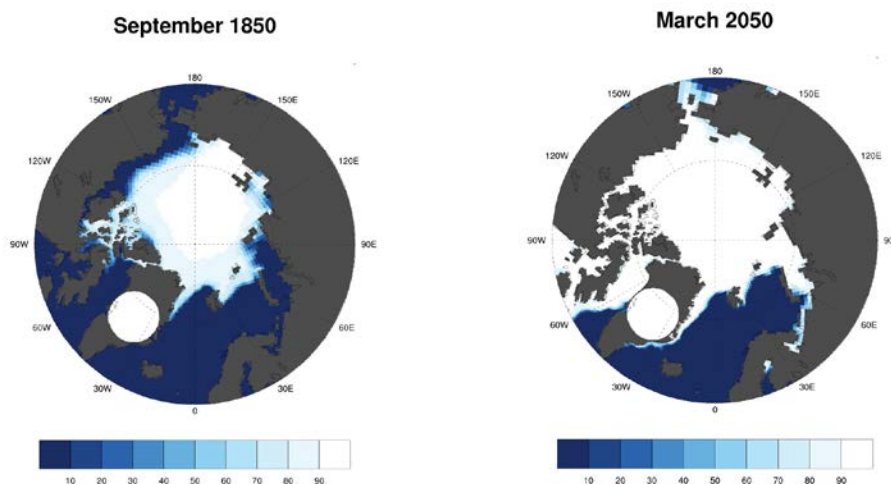


Abb. 2: Zeitliche Entwicklung der Meereisbedeckung (in Prozent) im September (links) und im März (rechts) im MPI-ESM. Während die Meereisausdehnung im Sommer allmählich von den Rändern zur Mitte der Arktis hin abnimmt, bleibt die Eisbedeckung im Winter hoch, bis sie zwischen den Jahren 2123 und 2129 in der langen RCP8.5-Simulation abrupt verschwindet. Um einen angemessenen Vergleich herzustellen, ist die Eisbedeckung in beiden Animationen ähnlich hoch. Die gezeigten Zeiträume sind daher unterschiedlich, denn das Wintermeereis erreicht eine bestimmte Bedeckung später als das Sommermeereis.

Interessanterweise stimmt der abrupte Meereisverlust im MPI-ESM mit Vorhersagen von einfachen Säulenmodellen überein. Diese einfachen Modelle lösen zwar den Jahresverlauf in der Arktis auf, können aber durch ihre punktuelle, säulenförmige Darstellung keine horizontalen Unterschiede zeigen. Sie zeigen einen abrupten Verlust des Wintermeereises an einem sogenannten Bifurkationspunkt: Das Bifurkationsszenario legt nahe, dass der abrupte Übergang zu einer eisfreien Arktis nicht umkehrbar ist und als Ergebnis von großen, sich verstärkenden Rückkopplungen eintritt, wie der Eis-Albedo-Rückkopplung oder der konvektiven Wolkenrückkopplung. Die Eis-Albedo-Rückkopplung bedeutet, dass sich Eisverlust und Erwärmung gegenseitig verstärken, da mehr Sonnenlicht absorbiert wird, wenn die helle Eisoberfläche durch dunkleres offenes Wasser ersetzt wird. Die konvektive Wolkenrückkopplung hängt mit der Bildung konvektiver Wolken über offenem Wasser zusammen. Sie können dazu beitragen, den Ozean während des arktischen Winters eisfrei zu halten, indem die nach unten gerichtete langwellige Strahlung verstärkt wird.

Der Gefrierpunkt als kritischer Schwellwert

Wie wichtig sind diese Rückkopplungen für den schnellen Meereisverlust im Winter in den komplexen Modellen? Ist das Bifurkationsszenario der einfachen Modelle eine geeignete Analogie für den abrupten Meereisverlust in den komplexen Klimamodellen? Das Forschungsteam hat die Expertise aus allen drei Abteilungen des MPI-M zusammengeführt und diese Fragen gemeinsam untersucht, indem sie die Eis-Albedo-Rückkopplung und die Wolkenrückkopplung im MPI-ESM unterdrückt haben.

Zu ihrer Überraschung fanden sie heraus, dass der Meereisverlust auch ohne die Rückkopplungen abrupt stattfindet (Abb. 3). Während die Wolkenrückkopplung generell sehr wenig Einfluss auf das Ergebnis hatte, verzögert das Deaktivieren der positiven Eis-Albedo-Rückkopplung den Verlust des Meereises. Allerdings betrifft dies vor allem den Verlust des Meereises im Sommer, während das Wintermeereis weiterhin an einem sehr markanten Übergangspunkt verschwindet. Das bedeutet, dass weder die Eis-Albedo-Rückkopplung noch die konvektive Wolken-Rückkopplung die ungleichmäßige Empfindlichkeit des Meereises im Sommer und Winter erklären können.

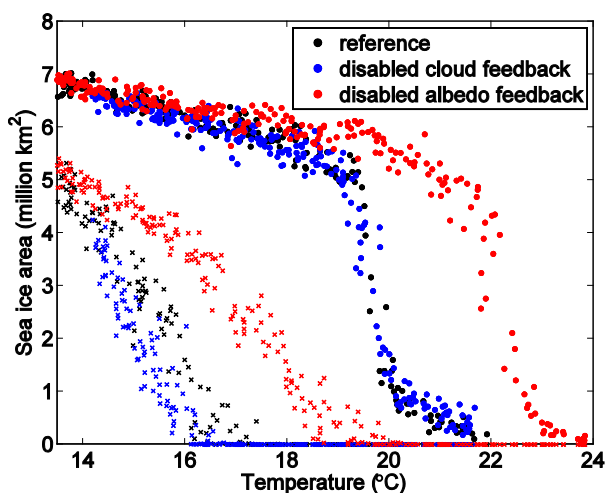


Abb. 3: Arktisches Meereisgebiet im März (Punkte) und im September (Kreuze) im Vergleich zu der mittleren globalen Lufttemperatur am Boden in drei Experimenten mit dem MPI-ESM.

Das Forschungsteam fand heraus, dass die starke Empfindlichkeit des Wintermeereises durch die Ungleichmäßigkeit von Abschmelzen und Gefrieren herrührt. Für einen eisfreien Sommer bedarf es eines kompletten Abschmelzens auch des dicksten Meereises. Deshalb nimmt die Eisbedeckung nur allmählich ab, da immer mehr des dünneren Eises abschmilzt. Im Fall von saisonalem Eis bleibt die Eisbedeckung jedoch solange hoch wie sich im Winter noch Meereis bildet. Wo sich der Ozean so stark erwärmt, dass sich das ganze Jahr über kein weiteres Eis mehr bilden kann, geht das saisonale Meereis auf Null zurück. Da die Wasseroberflächentemperatur im winterlichen arktischen Ozean relativ einheitlich ist, kann es so zu einer plötzlichen Reduktion des Eisgebietes innerhalb einer kurzen Zeitspanne kommen. Man kann diesen Vorgang mit einem See vergleichen, der nach einer kalten Nacht plötzlich mit einer dünnen Eisschicht bedeckt ist. Wenn die nächste Nacht etwas wärmer ist, verliert der See eine erhebliche Eisfläche. Das bedeutet, dass der Gefrierpunkt einen natürlichen Schwellenwert darstellt, der unabhängig von Strahlungsrückkopplungen ist.

Dieser Prozess ist sehr grundlegend und kommt daher in jedem analysierten Modell vor, unabhängig von speziellen Parametrisierungen. Somit ist er wahrscheinlich auch in der realen Welt relevant. Der Schwellenwertmechanismus weist darauf hin, dass ein schneller Eisverlust im Winter tatsächlich vorkommen kann, dass dieser Verlust aber noch ein reversibles, also umkehrbares, Phänomen ist.

Kann der abrupte Meereisverlust aus Beobachtungen vorhergesehen werden?

In einer zweiten Studie, die in *The Cryosphere* veröffentlicht wurde, haben Sebastian Bathiany, Dirk Notz und Kollegen der Universitäten Exeter (UK) und Wageningen (NL) untersucht, ob ein abrupter Meereisverlust anhand von beobachteten Veränderungen der Varianz und der zeitlichen Korrelation zwischen aufeinanderfolgenden Jahren (Autokorrelation) vorhergesagt werden kann. Die Theorie dynamischer Systeme besagt, dass eine Zunahme dieser statistischen Eigenschaften auf einen Verlust der Stabilität hinweisen kann. Daher wurde vorgeschlagen, die Zunahme von Varianz und Autokorrelation als Frühwarnsignale von nahenden abrupten Änderungen zu deuten. Wenn diese Theorie auf Meereis in der realen Welt angewendet werden könnte, würde das die Möglichkeit eröffnen, den abrupten Meereisverlust ohne die Nutzung von Modellen vorherzusagen. Auf diese Weise entstünde eine unabhängige Informationsquelle darüber, welches Zukunftsszenario des Meereisverlusts am plausibelsten ist.

Im Gegensatz zu dieser vielversprechenden Aussicht aus sehr idealisierten dynamischen Systemen, haben Bathiany und Kollegen keinen *Anstieg* gefunden, sondern eine robuste *Abnahme* von Varianz und Autokorrelation des Meereisvolumens vor dem Verlust des Sommermeereises, unabhängig davon, wie abrupt der Meereisverlust in jeglichen Meereismodellen vorgekommen ist. Sie schreiben dies der Tatsache zu, dass sich dünneres Eis schneller auf Störungen einstellen kann. Danach nimmt die Reaktionszeit des Eises – und somit auch die Autokorrelation – zu, weil die Reaktionszeit des Eises von der hohen Wärmekapazität des Meerwassers während der immer länger werdenden eisfreien Jahreszeit bestimmt wird. Diese Änderungen werden nicht von den Eigenschaften und dem Ursprung der Klimavariabilität in Klimamodellen beeinflusst und hängen nicht davon ab, ob der Meereisverlust in der Arktis abrupt oder irreversibel in einem Modell verläuft. Das Forschungsteam zeigt weiterhin, dass der momentane Klimawandel in der Arktis zu schnell verläuft, als dass man bedeutsame Variabilitätsänderungen rechtzeitig erkennen könnte.

Basierend auf diesen Ergebnissen scheint die Aussicht darauf, Frühwarnsignale vor einem abrupten Meereisverlust an einem Kipp-Punkt zu erkennen, sehr beschränkt zu sein. Das Forschungsteam macht jedoch auch Mut: Trotz kurzer Beobachtungsreihen und Rekonstruktionen ist es möglich, die Variabilität der Meereiseigenschaften der Vergangenheit und Zukunft abzuleiten. Da alle Modelle auf ein belastbares Verhältnis zwischen dem Mittel und der Variabilität der Meereiseigenschaften hinweisen, und dieses mithilfe von Grundprinzipien verstanden werden kann, haben die Ergebnisse Auswirkungen für die Variabilität des Meereises in verschiedenen Klimata - von einer ganz mit Eis bedeckten Erde bis zu einer komplett eisfreien Arktis.

Publikationen

1. Bathiany, S., Notz, D., Mauritsen, T., Brovkin, V. & Raedel, G., 2016: On the potential for abrupt Arctic winter sea-ice loss, *J. Climate*, 29, 2703-2719.

<http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/JCLI-D-15-0466.1>

2. Bathiany, S., van der Bolt, B., Williamson, M. S., Lenton, T. M., Scheffer, M., van Nes, E. H. & Notz, D., 2016: Statistical indicators of Arctic sea ice stability – prospects and limitations, *Cryosphere*, 10, 1631-1645.

<http://www.the-cryosphere.net/10/1631/2016/tc-10-1631-2016.pdf>

Kontakt

Dr. Sebastian Bathiany
Wageningen University & Research
Tel.: 0031 31 7483479
E-Mail: sebastian.bathiany@wur.nl

Dr. Dirk Notz
Max-Planck-Institut für Meteorologie
Tel.: 040 41173 - 163
E-Mail: dirk.notz@mpimet.mpg.de

Dr. Thorsten Mauritsen
Max-Planck-Institut für Meteorologie
Tel.: 040 41173 - 182
E-Mail: thorsten.mauritsen@mpimet.mpg.de

Prof. Victor Brovkin
Max-Planck-Institut für Meteorologie
Tel.: 040 41173 - 339
E-Mail: victor.brovkin@mpimet.mpg.de