

4.5 Erwärmung der Polarregionen in den letzten 50 Jahren: Ursachen und Folgen

DIRK NOTZ

Warming of the Polar Regions in the last 50 years - Causes and Consequences: The polar regions act as an early warning system of climatic changes on our planet. Climatic changes there are stronger and start earlier than in more equatorial regions. Measurements hence show roughly double as strong a warming in the Arctic in recent decades compared to the global mean. Changes in cloud coverage, the temperature stratification of the lower atmosphere, the retreat of sea ice and changes in atmospheric water vapor all contribute to the enhanced warming. This strong warming in turn amplifies the consequences of climatic change in the high latitudes: land ice and sea ice melt, permafrost thaws, the atmospheric circulation changes.

Die Polargebiete der Erde gelten als Frühwarnsystem eines globalen Klimawandels. Diese Charakterisierung beruht auf der Tatsache, dass Klimaveränderungen sowohl in Messdaten als auch in Modellstudien in den Polarregionen in der Regel weitaus stärker ausgeprägt sind als in niedrigeren Breiten. Diese allgemeine Tatsache zeigt sich auch beim derzeit stattfindenden Klimawandel sehr deutlich: Sowohl die Arktis als auch die Antarktische Halbinsel und große Teile der Westantarktis haben sich in den letzten 50 Jahren deutlich stärker erwärmt als der Rest der Erde. In der östlichen Antarktis zeigt sich hingegen nur eine leichte Erwärmung. In diesem Kapitel werden die Gründe für die starke Erwärmung der Polarregionen diskutiert und die Entwicklung in den letzten 50 Jahren näher dargestellt. Dabei wird insbesondere auch auf die regional sehr unterschiedliche Temperaturentwicklung in der Antarktis eingegangen. Das Kapitel schließt mit einer kurzen Zusammenfassung der bisher beobachteten Folgen der Erwärmung und gibt einen Ausblick auf die zu erwartende Temperaturentwicklung in den kommenden Jahrzehnten.

Mechanismen für die Verstärkung der Erwärmung in hohen Breiten

Eine Vielzahl von physikalischen Mechanismen trägt dazu bei, dass sich die Polargebiete der Erde während einer allgemeinen Klimaerwärmung deutlich stärker erwärmen als die niedrigeren Breiten. Nach wie vor ist die relative Bedeutung dieser Mechanismen für die derzeit stattfindende Erwärmung nicht eindeutig geklärt. Dies liegt insbesondere an zwei Gründen: Erstens gibt es in den Polarregionen kein ausreichend dichtes Messnetz, das es erlauben würde, die atmosphärischen Veränderungen der letzten Jahrzehnte zuverlässig zu erfassen. Entsprechende Messungen wären für die Abschätzung der relativen Wichtigkeit der verschiedenen Mechanismen von zentraler Bedeutung. Zweitens wirken die im Folgenden dargestellten Mechanismen nicht isoliert voneinander, sondern verstärken oder schwächen einander gegenseitig. Dies erschwert eine eindeutige Zuordnung der beobachteten Erwärmungsmuster zu einzelnen Mechanismen.

Eis-Albedo-Wechselwirkung

In der öffentlichen Diskussion wird am häufigsten die sogenannte Eis-Albedo-Wechselwirkung als Hauptursache für die verstärkte Erwärmung der Arktis genannt. Diese Wechselwirkung beruht auf der Tatsache, dass die ausgedehnten Schnee- und Eisflächen der Polarregionen aufgrund ihres sehr hohen Reflektionsvermögens wie ein gewaltiger Spiegel einen Großteil der einfallenden Sonnenstrahlung zurück ins Weltall reflektieren. Dieses hohe Reflektionsvermögen, das in der Fachwelt als „Albedo“ bezeichnet wird, kühlt damit die Polargebiete sehr effektiv, da nur ein kleiner Teil der Sonneneinstrahlung im polaren Klimasystem verbleibt: Etwa 60% der auf schneefreies, blankes Meereis fallenden Sonneneinstrahlung wird direkt reflektiert, für frisch gefallenen Schnee sind es sogar bis zu 90%. Das Reflektionsvermögen sinkt deutlich, sobald sich im Sommer Schmelzwasserpfützen auf dem Eis bilden, da diese einen Großteil der einfallenden Sonneneinstrahlung aufnehmen. Das gleiche gilt für Land- und Wasserflächen, die durch das Abschmelzen der Schnee- und Eisflächen im Sommer frei werden. Diese Flächen haben häufig ein Reflektionsvermögen von weniger als 20%, sodass hier die Sonnenstrahlung sehr effektiv aufgenommen wird. Hierdurch erwärmen sich die freien Wasser- und Landflächen im Sommer sehr effektiv, was zu einem weiteren Abschmelzen der umliegenden Eis- und Schneeflächen beiträgt. Dies wiederum führt zu einem Anwachsen der eisfreien Wasser- und Landflächen, noch mehr Sonnenstrahlung verbleibt im System, und das Eis geht noch weiter zurück. Dieser Kreislauf, der eine einmal begonnene Erwärmung sehr effektiv verstärkt, wird als Eis-Albedo-Wechselwirkung bezeichnet. Da dieser Kreislauf nur in schnee- und eisbedeckten Gebieten ablaufen kann, trägt er zu einer stärkeren Erwärmung der Polarregionen im Vergleich zu gemäßigteren Breiten bei.

Die relative Rolle der Eis-Albedo-Wechselwirkung für die beobachtete starke Erwärmung der Polargebiete ist nach wie vor unklar. Dies ist insbesondere deswegen der Fall, weil es eine Reihe von Faktoren gibt, die

die relative Bedeutung dieser Wechselwirkung für die Erwärmung der Polargebiete mindern können. So ist diese Wechselwirkung zum Beispiel nur während der Monate relevant, in denen die Sonne in den Polargebieten am Himmel steht. Im Herbst und Winter spielt damit diese Wechselwirkung höchstens eine indirekt Rolle für die verstärkte Erwärmung der Polargebiete, weil z.B. in diesen Monaten die aufgrund des Eisrückgangs im Sommer zusätzlich im Ozean gespeicherte Wärme wieder in die Atmosphäre freigesetzt wird. Außerdem ist die Eis-Albedo-Wechselwirkung nur dann von großer Bedeutung, wenn die Sonneneinstrahlung weitestgehend ungehindert auf die Erdoberfläche treffen kann. Die in Polargebieten häufigen tiefhängenden Wolkenfelder vermindern daher die Stärke des Eis-Albedo-Effekts. Insbesondere verstärken freiwerdende Wasserflächen den Wasserdampfeintrag in die Atmosphäre und begünstigen somit die Bildung von Wolken.

Temperatureffekte

Aus Modellsimulationen wissen wir, dass neben der Eis-Albedo-Wechselwirkung weitere Faktoren eine Rolle für die polare Verstärkung der Erwärmung spielen müssen. Insbesondere zeigen Simulationen von Klimaveränderungen auch dann eine polare Verstärkung der Erwärmungsmuster, wenn die Eis-Albedo-Wechselwirkung im entsprechenden Klimamodell explizit abgeschaltet war. Während diese Wechselwirkung insbesondere mit der sogenannten kurzwelligen Strahlung (also der sichtbaren und der UV-Strahlung der Sonne) interagiert, gibt es auch zwei wichtige Wechselwirkungen, die die sogenannte langwellige Strahlung betreffen. Hierunter versteht man die Wärmestrahlung der Erdatmosphäre, die in den Polarregionen im Jahresmittel mehr Energie an die Oberfläche liefert als die Solarstrahlung. Insbesondere verhindert die Wärmestrahlung der Erdatmosphäre eine extreme Auskühlung während der Polarnacht, wie sie ja zum Beispiel von der sonnenabgewandten Seite des Mondes mit Temperaturen unterhalb von -150 °C bekannt ist.

Die Wärmeabstrahlung der Erde stellt sich dabei im Klimagleichgewicht jeweils so ein, dass sich ein sogenanntes Strahlungsgleichgewicht ergibt: Die Menge an abgestrahlter Energie muss im zeitlichen Mittel identisch zu der Menge an aufgenommener Energie sein. Da sich im Moment aufgrund des zunehmenden Treibhauseffektes die an die Erdoberfläche gelieferte Energie erhöht, muss die Erdoberfläche ihrerseits mehr Energie abstrahlen. Diese abgestrahlte Energie hängt über das sogenannte Stefan-Boltzmann Gesetz direkt von der lokalen Temperatur ab. Gemäß diesem Gesetz ist die abgestrahlte Energie proportional zur vierten Potenz der Temperatur, $E \sim T^4$. Um bei einer tiefen Temperatur

eine gewisse Menge an zusätzlich vorhandener Energie abstrahlen zu können, ist aufgrund dieses Zusammenhangs eine größere Erwärmung nötig, als bei einer höheren Temperatur. Um z.B. eine erhöhte Einstrahlung von 1 W/m^2 auszugleichen, ist bei einer Temperatur von $+25\text{ °C}$ eine Erwärmung von etwa $+0,17\text{ °C}$ notwendig, bei einer Temperatur von -25 °C hingegen eine Erwärmung um $+0,29\text{ °C}$. Allein hierdurch erwärmen sich daher die Polargebiete mit ihren niedrigen Temperaturen bei einer globalen Klimaerwärmung stärker als andere Teile der Erde.

Darüber hinaus ist die vertikale Temperaturverteilung in den Polargebieten von einer häufigen, starken Inversion geprägt: Die Luftmassen nahe der Oberfläche sind, im Unterschied zu gemäßigeren Breiten, häufig deutlich kälter als die darüber liegenden Luftmassen. Es kommt daher kaum zu einer Vermischung der schweren, bodennahen Luftmassen mit den darüber liegenden Luftmassen. Eine Erwärmung dieser bodennahen Luftmassen kann daher nur sehr langsam an die darüber liegenden Luftmassen weitergegeben werden, sodass ein großer Teil der Erwärmung in Polargebieten in bodennahen Luftschichten konzentriert ist. Dies trägt ebenfalls zur vergleichsweise starken Erwärmung der Polargebiete bei.

Weitere Mechanismen

Neben den beiden ausführlich beschriebenen Mechanismen gibt es noch eine Reihe weiterer Prozesse, die zur verstärkten Erwärmung der Polargebiete beitragen. Diese können hier aus Platzgründen nur kurz beschrieben werden.

Wasserdampf und Wolken: Wolken spielen eine zentrale Rolle im Energiehaushalt der Polargebiete. Aufgrund der langen Polarnacht führen Wolken dort im Jahresmittel zu einer Erwärmung, wohingegen sie in niedrigeren Breiten im Mittel wegen ihrer Abschattungseffekte eher zu einer Abkühlung führen. Wenn in einer wärmeren Welt global die Menge an Wolken und Wasserdampf in der Luft zunehmen, so führt dies zu einer stärkeren Erwärmung der Polargebiete.

Höhe der Troposphäre: Aufgrund der niedrigen Lufttemperaturen in den Polargebieten ist die Troposphäre, also die untere Atmosphärenschicht, in der sich ein Großteil des Wettergeschehens abspielt, deutlich niedriger als in gemäßigeren Breiten. Für einen gegebenen Energieeintrag erwärmt sich daher die Troposphäre in den Polarregionen aufgrund ihres geringeren Volumens stärker.

Horizontaler Energietransport: Analysen der Erwärmungsmuster in der Arktis deuten darauf hin, dass ein großer Teil der Erwärmung auf eine Zunahme von horizontalen Wärmetransporten aus gemäßigten Breiten zu-

rückzuführen ist. Dies würde direkt zu einer verstärkten Erwärmung der Arktis relativ zu den gemäßigten Breiten führen. Die Mechanismen für diese Zunahme sind bisher nicht ausreichend verstanden, könnten aber mit großskaligen Veränderungen der vorherrschenden Zirkulationsmuster in der Atmosphäre zusammenhängen.

Aufteilung der zusätzlichen Wärme: Aufgrund ihrer niedrigeren Temperatur kann die Luft in den Polargebieten deutlich weniger Feuchtigkeit aufnehmen als die Luft in gemäßigteren Breiten. Dies führt dazu, dass in den Polargebieten der größte Teil von zusätzlich vorhandener Energie direkt zu einer Erwärmung führt, wohingegen insbesondere in den Tropen ein großer Teil der zusätzlichen Energie zur verstärkten Verdunstung von Wasser führt.

Erwärmung der Arktis

Eine zuverlässige Abschätzung der Erwärmung in der Arktis über die letzten Jahrzehnte ist äußerst schwierig, da es insbesondere im Inneren der Arktis keine kontinuierlichen Messungen gibt. Die Erwärmung über dem Arktischen Ozean, der den Großteil der Arktis ausmacht, kann daher nicht aus Messungen abgeleitet werden, sondern muss indirekt abgeschätzt werden. Hierfür gibt es primär zwei Möglichkeiten: Zum einen können sogenannte Reanalysen verwendet werden. Dies sind Simulationen mit komplexen Atmosphärenmodellen, in die gemessene Daten aus Radiosonden, von Satelliten und von Bodenstationen eingehen. Durch die Annäherung der modellierten Entwicklung der Atmosphäre an die Messungen lässt sich aus dem Modell heraus abschätzen, wie sich die Atmosphäre räumlich und zeitlich zwischen den Messungen entwickelt hat. Leider sind die entsprechenden Simulationen insbesondere im Inneren der Arktis recht ungenau und weichen häufig deutlich von vorhandenen Messungen ab, die im Rahmen von Messprogrammen im zentralen Arktischen Ozean gemacht wurden.

Ähnliche Schwierigkeiten gibt es bei der zweiten Methode, die häufig verwendet wird, um die Temperatur über dem Arktischen Ozean abzuschätzen. Im Rahmen dieser Methode werden Messungen an umliegenden Landstationen großräumig interpoliert. Wie dünn dabei die tatsächliche Datenlage ist, lässt sich aus *Abb. 4.5-1a* und *-b* erkennen. Sie zeigt die regionale Verteilung des globalen Erwärmungstrends über den Zeitraum 1963-2012. In *Abb. 4.5-1a* ist dabei eine regionale Verteilung gezeigt, bei der angenommen wurde, dass die Daten an der eigentlichen Messstation von der Temperaturentwicklung in einem Umkreis mit einem Radius von 1200 km beeinflusst sind. Hierdurch lässt sich trotz der geringen Dichte an Messstationen in der Arktis die Temperaturentwicklung über dem Arktischen Ozean beinahe

lückenlos abschätzen. Es ergibt sich dabei für die zentrale Arktis eine Erwärmung in diesem Zeitraum von etwa 2,8 °C. Dies ist mehr als dreimal soviel wie der Wert von 0,8 °C Erwärmung, der sich aus dieser Analyse für die globale Erwärmung ergibt. Die entsprechende Karte gibt aber möglicherweise kein realistisches Bild der tatsächlichen Temperaturentwicklung in der zentralen Arktis: Benutzt man einen Umkreis mit einem Radius von nur noch 250 km für eine entsprechende Analyse, so ergeben sich über dem Arktischen Ozean weite Bereiche mit Datenlücken (*Abb. 4.5-1b*). Aufgrund dieser Lücken sinkt die mittlere globale Erwärmung für den gesamten Zeitraum von 0,8 °C auf 0,7 °C, eine Abschätzung der Erwärmung in der Arktis ist nicht mehr zuverlässig möglich.

Diese Abnahme der abgeschätzten globalen Erwärmung bei Vernachlässigung der Polargebiete ist möglicherweise von Bedeutung für die Diskussion um die geringe globale Erwärmung in den ersten Jahren des 21. Jahrhunderts. Der extreme Rückgang von Meereis in der Arktis in diesen Jahren deutet darauf hin, dass sich das Innere der Arktis in den letzten Jahren stark erwärmt hat. Die entsprechende Erwärmung fließt allerdings in die meisten Abschätzungen zur globalen Temperaturentwicklung nicht ein, sodass entsprechende Abschätzungen

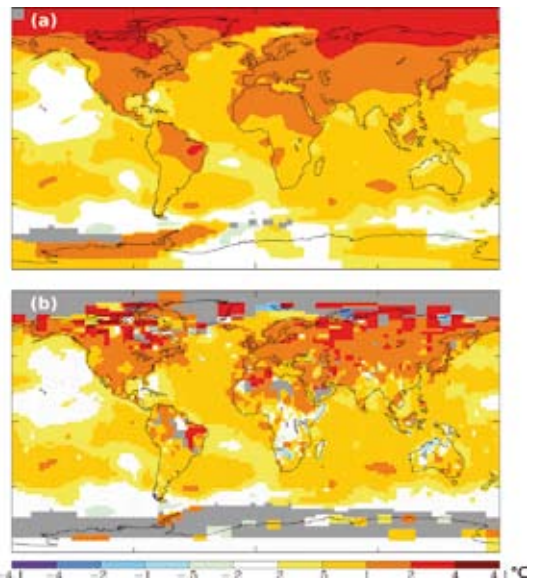


Abb. 4.5-1: Entwicklung der globalen Temperaturen im 50-Jahreszeitraum 1963-2012. Alle Angaben sind in °C und beziehen sich auf den gesamten Zeitraum (a) Geographische Verteilung der Erwärmung unter der Annahme, dass die Daten einer einzelnen Messstation Beiträge aus einem Umkreis mit einem Radius von 1.200 km enthalten. (b) wie (a), allerdings mit der Annahme, dass die Daten einzelner Messstationen nur Beiträge aus einem Umkreis mit einem Radius von 250 km enthalten. (Quelle: NASA/GISS Oberflächentemperatur)

möglicherweise eine deutlich geringere mittlere globale Erwärmung ergeben als der Wirklichkeit entspricht.

Während die mittlere globale Erwärmung über die letzten 50 Jahre jahreszeitlich recht einheitlich verlaufen ist, gibt es in der Arktis starke saisonale Unterschiede im Erwärmungstrend (Abb. 4.5-2). Während sich gemäß der hier verwendeten Daten die Arktis im Sommer in den letzten 50 Jahren im Mittel um etwa 2 °C erwärmt hat, ergibt die Abschätzung für den Winter eine Erwärmung um mehr als 3 °C. Wie beschrieben, beruhen beide Abschätzungen primär auf Messungen der umliegenden Landstationen. Punktuelle Messungen im Inneren der Arktis lassen den Schluss zu, dass diese Erwärmungsraten eine untere Grenze für die tatsächliche Erwärmung der Arktis darstellen.

Während die bisher diskutierten Karten bereits die eingangs diskutierte polare Verstärkung der Erwärmung zeigen, so wird diese Verstärkung aus den zonal (also entlang der Breitenkreise) gemittelten Erwärmungsraten noch deutlicher (Abb. 4.5-3). Die ermittelte Erwärmung liegt für den Zeitraum 1963-2012 auf der gesamten Südhalbkugel und auf der Nordhalbkugel bis etwa 45 °N unterhalb von 1 °C, um dann zum Nordpol hin stark anzusteigen. Die Abflachung des Erwärmungsprofils nördlich von 80 °N hängt damit zusammen, dass für den zentralen Arktischen Ozean keine direkten Messungen vorliegen, sodass sich die Erwärmung als kons-

tanter Mittelwert der umliegenden Landstationen ergibt.

Bisher gibt es keinen klaren wissenschaftlichen Konsens dazu, welcher der eingangs geschilderten Prozesse für die gemessene Verstärkung der Erwärmung in der Arktis die Hauptverantwortung trägt. Als mögliche Kandidaten wurden bisher insbesondere die Eis-Albedo-Wechselwirkung, Veränderungen im Wasserdampfhaushalt, sowie die Advektion von Wärme aus südlicheren Breiten diskutiert. Für eine gesicherte Abschätzung des dominierenden Prozesses wären allerdings zuverlässigere Messungen des Höhenprofils der Erwärmung notwendig: Wäre die Eis-Albedo-Wechselwirkung der dominierende Prozess für die beobachtete verstärkte Erwärmung, so müsste die Erwärmung am stärksten in Bodennähe ausgefallen sein. Wären hingegen atmosphärische Wärmetransporte oder Änderungen im Wasserdampfhaushalt ausschlaggebend, so müsste die Erwärmung in höheren Luftschichten dominieren. Die vorhandenen Datensätze aus Satellitenmessungen, vereinzelt Punktmessungen und verschiedenen Reanalysen widersprechen sich hier teilweise, sodass es bisher zu dieser Frage keinen wissenschaftlichen Konsens gibt.

Gesichert ist hingegen, dass die Erwärmung der Arktis in den letzten Jahrzehnten weit außerhalb der natürlichen Schwankungsbreite für moderne Klimabedingungen liegt. Insbesondere beendet die Erwärmung der letzten Jahrzehnte eine seit vielen Jahrhunderten stattfindende langsame Abkühlung der Arktis, die durch eine langsame Veränderung der Erdachsenneigung zustande gekommen war (KAUFMANN et al. 2009). Analysen der beobachteten Erwärmung und deren Vergleich mit Simulationen von Klimamodellen machen deutlich, dass die vom Menschen verursachte Verstärkung des globalen Treibhauseffekts die Hauptursache der starken Erwärmung in den letzten Jahrzehnten ist.

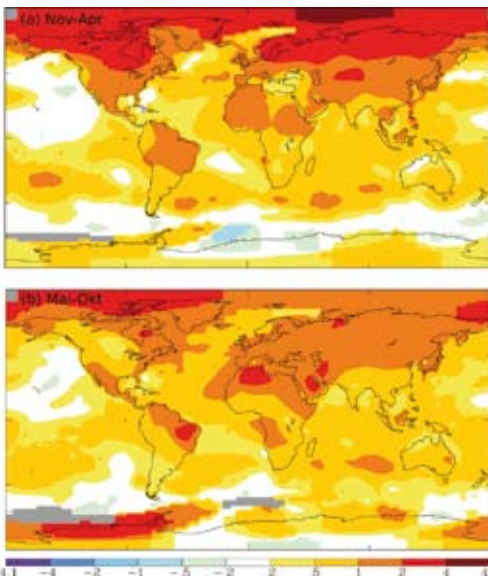


Abb. 4.5-2: Entwicklung der globalen Temperaturen im 50-Jahreszeitraum 1963-2012 (a) in den Monaten Nov-Mai und (b) in den Monaten Juni-Oktober. Beide Abbildungen zeigen die Erwärmung unter der Annahme, dass die Daten einer einzelnen Messstation Beiträge aus einem Umkreis mit einem Radius von 1.200 km enthalten (Quelle: NASA/GISS Oberflächentemperatur).

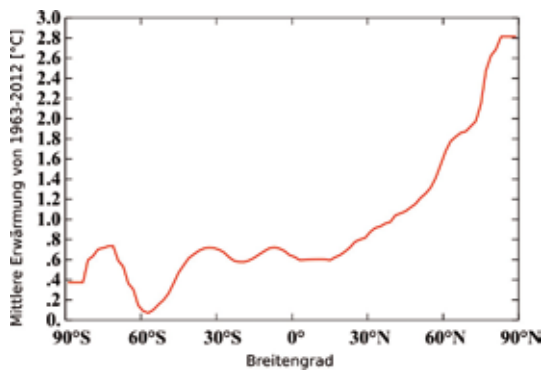


Abb. 4.5-3: Entlang der Breitenkreise gemittelte Temperaturentwicklung im 50 Jahreszeitraum 1963-2012. Die Abbildung zeigt die Erwärmung unter der Annahme, dass die Daten einer einzelnen Messstation Beiträge aus einem Umkreis mit einem Radius von 1.200 km enthalten (Quelle: NASA/GISS Oberflächentemperatur).

Erwärmung der Antarktis

Wie in der Arktis, so gibt es auch in der Antarktis nur sehr vereinzelte Messstationen, die eine zuverlässige Abschätzung von Erwärmungstrends zulassen. Die Lage dieser Stationen lässt sich in *Abb. 4.5-1b* direkt an den farbigen Flecken in der Antarktis ablesen. Aus diesen Messungen und einer teilweise modellgeleiteten Interpolation räumlich und zeitlich fehlender Daten ergibt sich, dass sich in den letzten 50 Jahren die gesamte Antarktis erwärmt hat. Allerdings fällt diese Erwärmung räumlich stark unterschiedlich aus. Die Erwärmung konzentriert sich insbesondere im westlichen Teil der Antarktis. Viele Jahre war man dabei davon ausgegangen, dass sich in diesem westlichen Teil vor allem die Antarktische Halbinsel sehr stark erwärmt hat, jener Zipfel der Antarktis, der in Richtung Südamerika vergleichsweise weit Richtung Norden reicht.

Neuere Studien zeigen jedoch, dass sich auch das Innere der Westantarktis in den letzten Jahrzehnten deutlich stärker erwärmt hat als das globale Mittel. Abschätzungen zeigen dabei eine Erwärmung von etwa 2,5 °C, womit die zentralen Teile der Westantarktis zu den sich am schnellsten erwärmenden Gegenden der Erde zählt (BROMWICH et al. 2013). Die Erwärmung ist dabei im südlichen Frühling und Winter besonders stark und fällt im südlichen Sommer etwas schwächer aus (vgl. auch *Abb. 4.5-2a* (Südsommer) und *4.5-2b* (Südwinter)). Die beobachtete Erwärmung scheint einen Zusammenhang zur Erwärmung des tropischen Pazifiks zu haben und lässt sich durch hierdurch hervorgerufene Veränderungen in der atmosphärischen Zirkulation erklären (DING et al., 2011).

Im deutlichen Kontrast zur starken Erwärmung in der westlichen Antarktis steht eine recht geringe Erwärmung der Ostantarktis. Frühere Studien zeigten für den Zeitraum 1969-2000 für diesen Teil der Antarktis sogar eine leichte Abkühlung, die aber beim Betrachten des 50-Jahreszeitraums von 1963-2012 nur noch sehr vereinzelt auftritt (vgl. *Abb. 4.5-1*). Die geringe Erwärmung der Ostantarktis, mit einer Gesamterwärmung von nur etwa 0,5 °C in den letzten 50 Jahren, führt zu der deutlichen Asymmetrie in den zonal gemittelten Erwärmungsmustern, die in *Abb. 4.5-3* dargestellt sind: Gegenüber der klaren polaren Verstärkung in hohen nördlichen Breiten ist gemittelt über die gesamte Antarktis keine entsprechende Verstärkung der globalen Erwärmung in den hohen südlichen Breiten zu erkennen.

Das Fehlen einer starken Erwärmung in der Ostantarktis kann durch Veränderungen in der atmosphärischen Zirkulation erklärt werden, die mit dem Ozonloch über der Antarktis zusammenhängen. Mit diesem Begriff wird die insbesondere durch die menschliche Freisetzung von FCKWs verursachte Abnahme der

Ozonkonzentration in der Stratosphäre über der Antarktis bezeichnet. Da Ozon sehr effektiv einen Großteil der in der Sonnenstrahlung enthaltenen UV-Strahlung absorbiert, führt eine Abnahme der Ozonkonzentration zu einer Abkühlung der Stratosphäre, insbesondere in deren unteren Schichten. Hierdurch steigt die Höhe der Tropopause an, die die Stratosphäre von der darunterliegenden Troposphäre trennt. Dies wiederum führt zu einer Verstärkung des sogenannten Polarwirbels, der als gewaltige Atmosphärenströmung die Luftmassen im Inneren der Antarktis von den umliegenden Luftmassen isoliert. Die Verstärkung des Polarwirbels vermindert somit den Austausch von Luftmassen zwischen dem Innern der Antarktis und den weiter äquatorwärts liegenden Regionen. Dies führt in der Summe zu der beobachteten nur sehr leichten Erwärmung der Ostantarktis.

Folgen der Erwärmung

Die Folgen der Erwärmung in den Polargebieten ziehen sich wie ein roter Faden durch nahezu alle Kapitel dieses Buches. Hier sei daher nur kurz auf die klimatologisch wichtigsten Faktoren eingegangen. Mehr Details finden sich in den jeweiligen Kapiteln.

Meereis: (Kap. 2.8 - NOTZ). In der Arktis führt die dortige Erwärmung zu einem starken Rückgang des Meereises. Sowohl dessen Fläche als auch dessen Dicke haben sich in den letzten Jahrzehnten etwa halbiert, sodass das Volumen des Meereises auf etwa 25% im Vergleich zu den 1960er Jahren zurückgegangen ist. Da das Meereis im Arktischen Ozean komplett von Land eingeschlossen ist, reagiert es sehr direkt auf Änderungen in der vorherrschenden Lufttemperatur. In der Antarktis hat sich hingegen das Meereis in den letzten Jahrzehnten nicht nennenswert verändert, insgesamt ist sogar eine leichte Zunahme zu erkennen. Dies liegt zum einen an der Tatsache, dass die Erwärmung in der Antarktis im Mittel deutlich schwächer ausfällt als in der Arktis. Wichtiger ist jedoch die Tatsache, dass das Meereis im Südlichen Ozean frei treiben kann, sodass seine Ausdehnung primär von den vorherrschenden Windmustern abhängt. Insbesondere ablandige Winde haben sich in den letzten Jahren verstärkt, wodurch das im Südlichen Ozean Meereis über eine größere Fläche verteilt wird.

Landeis: (Kap. 2.7 - MAYER & OERTER). In der Arktis zeigen die meisten Gletscher und insbesondere das Inlandeis in Grönland eine Erhöhung der Schmelzraten, die direkt auf die Erwärmung zurückgeführt werden kann. Das dabei entstehende Schmelzwasser ist in Grönland für etwa die Hälfte des gesamten Eisverlustes verantwortlich, die andere Hälfte wird durch das Kalben von ins Meer endenden Gletschern gebildet. Die Ausdehnung des Oberflächenschmelzens trägt daher

signifikant zum erhöhten Massenverlust in Grönland bei. In der Antarktis ist es hingegen insbesondere aufgrund der recht geringen Erwärmung in den letzten Jahrzehnten weiterhin so kalt, dass der Abfluss von Oberflächenschmelzwasser für die gesamte Massenbilanz nur eine untergeordnete direkte Rolle spielt. Indirekt führt jedoch die Erwärmung zu Veränderungen im Schmelzwasserabfluss einzelner Gletscher, die zur Destabilisierung der Schelfeisgebiete führen können. Insgesamt tragen die Verluste von Landeis in Grönland und der Antarktis im Moment mit etwa 5 mm pro Jahrzehnt zum globalen Anstieg des Meeresspiegels bei; IPCC gibt eine Spanne von 4 mm bis 8 mm an.

Permafrost: (Kap. 1.7 - SCHIRRMESTER & HUBBERTEN) In weiten Gebieten der Arktis reicht die aktive Schicht des Permafrostes in den letzten Jahrzehnten deutlich tiefer in den Erdboden hinein als früher. Diese aktive Schicht bezeichnet jene oberflächennahe Schicht des Permafrostes, die im Sommer auftaut und im Winter wieder gefriert. Die Datendichte ist allerdings sehr gering, und regionale Veränderungen zum Beispiel in der jahreszeitlichen Verteilung von Schneefall machen eine allgemeingültige Abschätzung des direkten Temperatureinflusses schwierig. Die Erwärmung der oberen Schichten liegt teilweise oberhalb von 2 °C. In der Antarktis gibt es kaum Gebiete mit Permafrost.

Schnee: In der Arktis ist der Zeitraum, in dem Schnee liegt, in den vergangenen Jahrzehnten deutlich kürzer geworden. In allen Monaten hat die schneebedeckte Fläche abgenommen, wobei die Flächenabnahme im Juni bei mehr als 10% liegt. In einigen kälteren Gebieten sowohl der Arktis als auch der Antarktis hat die Menge an Schneefall zugenommen, da wärmere Luft mehr Feuchtigkeit transportieren kann als kältere Luft. Die Auswirkungen einer Erwärmung auf die Schneebedeckung können somit regional stark voneinander abweichen.

Ausblick

Nach diesem Überblick über die Temperaturentwicklung der Polargebiete in den vergangenen Jahrzehnten sei hier zum Abschluss noch kurz auf die mögliche zukünftige Entwicklung eingegangen. Diese hängt aufgrund der dominierenden Rolle menschlicher Aktivitäten für die derzeitige Klimaentwicklung stark

von der zukünftigen anthropogenen Emission von Treibhausgasen ab. Im fünften Sachstandsbericht des Weltklimarates liegt die Spanne der weiteren Erwärmung in der Arktis bis zum Ende des 21. Jahrhunderts im Vergleich zu den letzten 20 Jahren im Winter bei +4 °C bis mehr als +15 °C, im Sommer jeweils deutlich darunter. Die niedrigste Zahl bezieht sich dabei auf das sogenannte RCP 2.6 Szenario der Klimasimulationen, bei denen der Ausstoß von Treibhausgasen bis zum Jahr 2050 deutlich reduziert wird und zum Ende des Jahrhunderts auf nahezu Null zurückgegangen ist. Die größte Erwärmung stammt aus dem RCP 8.5 Szenario, das davon ausgeht, dass der Ausstoß von Treibhausgasen weitestgehend ungebremst weitergeht. Die Erwärmung fällt dabei im Winter besonders stark in jenen Regionen des Arktischen Ozeans aus, in denen das Meereis am stärksten zurückgeht. Im Sommer ist hingegen die Erwärmung über den umliegenden Landmassen am deutlichsten ausgeprägt.

In der Antarktis projizieren die Modelle eine Erwärmung zwischen etwa +1 °C und +4 °C im Winter und einer ähnlichen Erwärmung im Sommer. Nur über den Meeresflächen des Südlichen Ozeans fällt die Bandbreite der möglichen Erwärmung im Sommer mit etwa +0.5 °C bis +2 °C deutlich niedriger aus.

Insbesondere in den Szenarien mit einem weiterhin hohen menschlichen Ausstoß von Kohlendioxid setzt sich die Erwärmung im 22. Jahrhundert über die hier zusammengefassten Werte hinaus fort.

Literatur

- BROMWICH et al. (2012), Central West Antarctica among the most rapidly warming regions on Earth, *Nature Geoscience*, 6, 139-145.
 DING et al., (2011), Winter warming in West Antarctica caused by central tropical Pacific warming, *Nature Geoscience*, 4, 398-403.
 KAUFMANN et al. (2009), Recent Warming Reverses Long-Term Arctic Cooling, *Science*, 325(5945), 1236-1239.

Kontakt:

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