

Das Klima am Ende einer Warmzeit

Frank Kaspar und Ulrich Cubasch

Institut für Meteorologie
 Dr. Frank Kaspar, Prof. Dr. Ulrich Cubasch
 Carl-Heinrich-Becker Weg 6-10
 12165 Berlin
 + 49 - 30 - 838 71121, - 71217
 frank.kaspar@met.fu-berlin.de

Mögliche zukünftige Veränderungen des globalen Klimas als Folge steigender Treibhausgasemissionen werden derzeit intensiv diskutiert. Klimamodelle werden eingesetzt, um das Ausmaß dieser Veränderungen abzuschätzen. Um die Zuverlässigkeit dieser Modelle zu beurteilen, wird zunächst geprüft, ob diese in der Lage sind, das gegenwärtige Klima zufriedenstellend zu simulieren. Das erwartete Ausmaß zukünftiger Klimaänderungen unterscheidet sich aber deutlich von den Klimazuständen, die während der letzten Jahrzehnte oder auch Jahrhunderte aufgetreten sind. Es ist daher wünschenswert, die Modelle

auch an Klimazuständen zu testen, die deutlich von der heutigen Situation abweichen. Hierfür bieten sich beispielsweise die Zyklen von Warm- und Eiszeiten an, die während der letzten 500 000 Jahre aufgetreten sind. Gleichzeitig erhöhen derartige Modellanwendungen unser Verständnis der klimatischen Prozesse, die für diese Klimazyklen verantwortlich sind.

Die Klimageschichte der letzten Jahrhunderttausende ist in unterschiedlichen geologischen Archiven dokumentiert, beispielsweise Eisbohrkernen oder Tiefseesedimenten. Diese zeigen, dass während der letzten 500 000 Jahre Warm- und Kaltzeiten im regelmäßigen Wechsel aufgetreten sind (Abb. 1). Warmzeiten traten etwa alle 100 000 Jahre auf und dauerten zwischen 7000 und 17 000 Jahren. Die heutige Warmzeit, das Holozän, dauerte bisher etwa 11 500 Jahre. Am Meteorologischen Institut der Freien Universität Berlin wurden in Zusammenarbeit mit dem Max-Planck-Institut für Meteorologie (Hamburg) Klimasimulationen der Eem-Warmzeit durchgeführt. Diese war die letzte Warmzeit vor der heutigen. Sie begann etwa 127 000 Jahre vor heute, was sich

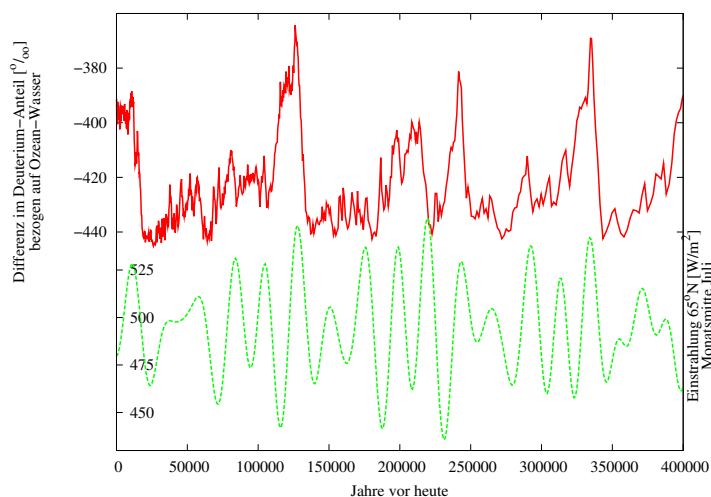
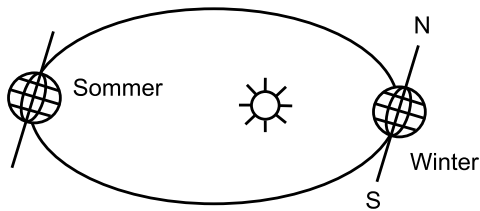
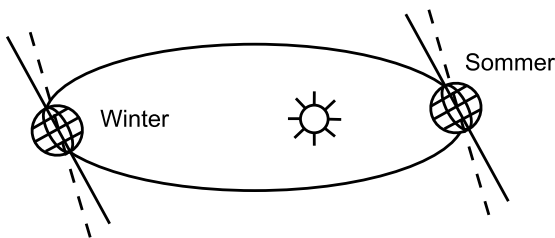


Abb. 1: Entwicklung von Temperatur und Einstrahlung während der letzten 500 000 Jahre. Die obere Kurve zeigt die Veränderung der in einem antarktischen Eisbohrkern gemessenen Deuterium-Anteile. Diese Veränderungen entsprechen näherungsweise der Veränderung der atmosphärischen Temperatur. Eine Veränderung von 9‰ entspricht dabei einer Temperaturänderung von 1°C. Die hier gezeigten Deuterium-Daten stammen von einem Eisbohrkern, der im Rahmen des 'European Project for Ice Coring in Antarctica (EPICA)' gebohrt wurde (75°06' S, 123°21' E). Die untere Kurve zeigt die Veränderung der solaren Einstrahlung auf dem 65-ten Breitengrad der Nordhemisphäre für die Monatsmitte des Juli.

Heutige Situation:



Situation während der Eem-Warmzeit:



beispielsweise in dem Auftreten von Mischwäldern in Europa gezeigt hat. Ab etwa 115 000 Jahren vor heute verschwanden diese im Nordosten Europas wieder und wurden durch offene Vegetation ersetzt. Auch aus antarktischen Eisbohrkernen wurde für diesen Zeitpunkt eine starke Temperaturreduktion abgeleitet (Abb. 1). Dieser Zeitpunkt repräsentiert daher in etwa das Ende der Eem-Warmzeit und den Beginn einer neuen Eiszeit.

Die Simulationen wurden im Rahmen eines Verbundprojekts durchgeführt, das durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung innerhalb des Forschungsprogramms DEKLIM gefördert wurde. In diesem Projekt wird in einer interdisziplinären Zusammenarbeit versucht, den zeitlichen Ablauf und die Ursachen der Vorgänge am Ende einer Warmzeit zu identifizieren:

- Seesedimente mit jährlicher Schichtung werden zur Bestimmung der Länge der Warmzeit genutzt.
- Die Entwicklung neuer Datierungsmethoden hilft bei der zeitlichen Einordnung.
- Auf Basis von Pollenfunden werden die Temperaturen der Warmzeiten rekonstruiert.
- Mit Hilfe verschiedener Klimamodelle werden atmosphärische Prozesse und die Wechselwirkungen der Klimakomponenten untersucht.

Abb. 2:

Vergleich der heutigen Konfiguration der Erdbahn mit der Situation während der Eem-Warmzeit. Während der Eem-Warmzeit war die Erdachse stärker geneigt und die Exzentrizität war größer. Außerdem traten die Sommer der Nordhemisphäre auf, während sich die Erde auf einem sonnennahen Punkt der Bahn befand. Heute treten die Sommer auf einer sonnenfernen Bahnposition auf. Insgesamt führte die Kombination dieser Faktoren während der Eem-Warmzeit zu einer deutlich erhöhten Sommerstrahlung auf der Nordhalbkugel.

In den am Meteorologischen Institut durchgeführten Simulationen werden die klimatischen Auswirkungen einer veränderten Erdbahn analysiert. Die Erde bewegt sich auf einer Ellipse um die Sonne. Diese Bewegung wurde bereits durch Johannes Kepler in den „Keplerschen Gesetzen“ beschrieben. Würde die Bewegung der Erde nur durch das Gravitationsfeld der Sonne beeinflusst, so würde die Bahnellipse der Erde keiner zeitlichen Veränderung unterliegen. Veränderungen in der Bahn ergeben sich durch den Einfluss der Gravitationseffekte der übrigen Planeten. Als Folge daraus ändert sich die Exzentrizität der Bahnellipse (d.h. das Verhältnis der beiden Halbachsen), sowie die Richtung der Hauptachse. Mit Hilfe der Gravitationsgleichungen können die Positionen der Planeten für Zeitpunkte in Vergangenheit und Zukunft berechnet werden. Die Rotationsachse der Erde steht nicht senkrecht zur Bahnebene, sondern in einem Winkel zur Senkrechten, der heute etwa 23° beträgt und mit einer Periode von 41000 Jahren zwischen 22° und $24,5^\circ$ schwankt. Durch den Einfluss der Gravitationskräfte rotiert die Achse um die Senkrechte, wodurch eine Verschiebung des Frühlingspunktes auf der Bahn bewirkt wird (Abb. 2). Unter Berücksichtigung all dieser Beiträge lässt sich die Sonneneinstrahlung zu jedem Zeitpunkt für jeden Ort der Erde berechnen. Schon während des 19. Jahrhunderts wurden Änderungen der Erdbahn als mögliche Ursache der Zyklen von Warm- und Eiszeiten diskutiert. Diese Idee wird heute als Milankovich-Theorie bezeichnet. Der serbische Astrophysiker Milutin Milankovich hat Einstrahlungskurven für verschiedene Breitengrade berechnet und versucht, einen Zusammenhang zur Schneegrenze herzustellen.

Obwohl die Veränderung der Bahnparameter eine deutliche Änderung der jah-

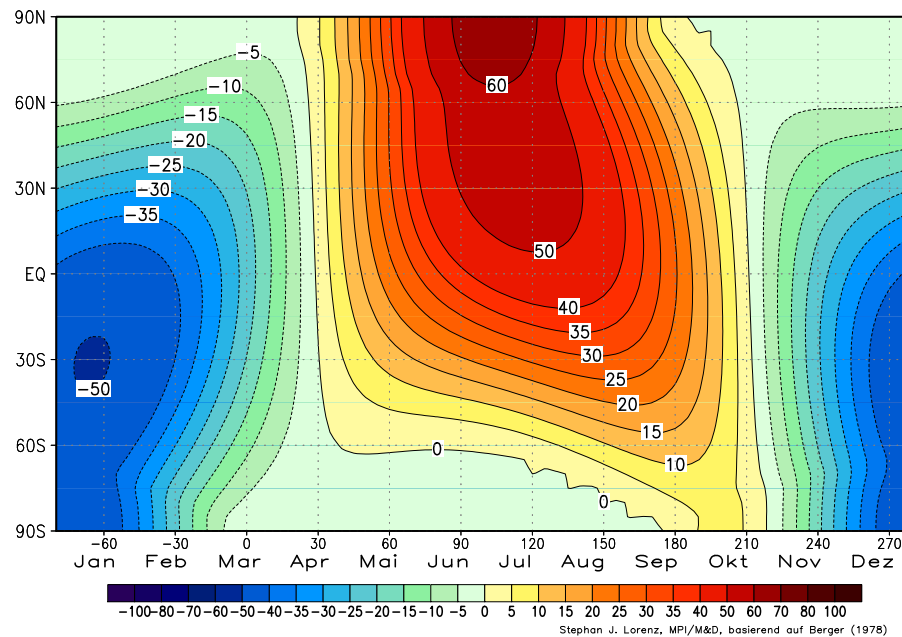


Abb. 3:
 Die Abbildung zeigt die Unterschiede der solaren Einstrahlung während der Eem-Warmzeit (125 000 Jahre vor heute) im Vergleich zu heute, wie sie sich aus den veränderten Erdbahnparametern ergeben. Deutlich sichtbar ist die stark erhöhte Sommereinstrahlung auf der Nordhemisphäre, sowie die Reduktion der Einstrahlung während der Wintermonate. Am Ende der Eem-Warmzeit (ca. 115 000 Jahre vor heute) lag eine nahezu entgegengesetzte Situation vor, in der die Sommereinstrahlung der Nordhemisphäre deutlich niedriger gewesen ist und eine erhöhte Wintereinstrahlung auftrat.

reszeitlichen Einstrahlung an bestimmten Orten bewirken kann, ändert sich die über ein komplettes Jahr global durch die Erde empfangene Einstrahlung nur geringfügig (weniger als 1 %). Diese Veränderung reicht nicht aus, um die Temperaturänderungen zwischen Eiszeiten und Warmphasen direkt zu erklären. Für die Erklärung der starken Temperaturänderungen sind also verstärkende Rückkopplungen im Klimasystem erforderlich. Moderne Klimamodelle sind gekoppelte Systeme, die beispielsweise die Teilsysteme Atmosphäre-Ozean-Eis so miteinander koppeln, dass diese Systeme nichtlineare Dynamiken auf langen Zeitskalen entwickeln können.

Für die hier vorgestellten Untersuchungen wurde ein Klimamodell verwendet, das am Hamburger Max-Planck-Institut für Meteorologie entwickelt wurde und in anderen Studien auch zur Simulation zukünftiger Klimaänderungen eingesetzt wird. Die Atmosphäre wird von diesem Modell in einer räumlichen Auflösung dargestellt, die Gitterboxen mit einer Kantenlänge von ca. 420 km entspricht, sowie 19 vertikalen Schichten. An dieses Atmosphärenmodell ist ein Ozeanmodell gekoppelt. In den hier vorgestellten Untersu-

chungen wurden die Parameter der Erdbahn an Bedingungen der Eem-Warmzeit angepasst. Dazu wurden zwei Zeitpunkte mit deutlich unterschiedlichen Einstrahlungsbedingungen ausgewählt. 125 000 Jahre vor heute war die Sonneneinstrahlung auf der Nordhalbkugel im Sommer erheblich stärker als heute, im Winter dagegen geringer (Abb. 1 und 3). Es liegt also ein verstärkter jahreszeitlicher Verlauf der Einstrahlung auf der Nordhalbkugel vor. 115 000 Jahre vor heute war der jahreszeitliche Verlauf auf der Nordhalbkugel abgeschwächt, d.h. die Sommereinstrahlung war deutlich reduziert, die Wintereinstrahlung erhöht. Der erste Zeitpunkt repräsentiert ungefähr die Mitte der Warmzeit, der zweite Zeitpunkt entspricht in etwa dem Ende. In den Modellrechnungen wurden auch die atmosphärischen Treibhausgaskonzentrationen an die Bedingungen dieser Zeitpunkte angepasst. Da sich diese aber jeweils nur geringfügig vom vorindustriellen Wert unterscheiden, beeinflussen diese die Simulationsergebnisse nur unwesentlich. Eine Simulation des vorindustriellen Zustands wird zum Vergleich verwendet.

In der Simulation der Warmphase führt die deutlich erhöhte Sommereinstrahlung auf der

Nordhalbkugel zu einer deutlichen Erhöhung der Sommertemperaturen gegenüber der vorindustriellen Simulation (Abb. 4). Diese Erhöhung ist über Landflächen stärker ausgeprägt als über den Ozeanen. Auf fast allen kontinentalen Gebieten nördlich von 30°N reagiert das Modell mit einer Temperaturerhöhung von mindestens +2°C. Teilweise treten aber noch deutlich stärkere Temperaturerhöhungen auf, in Teilen Zentralasiens und Sibiriens verzeichnet man Temperaturanstiege von erheblich über +4°C.

Dieses Verhalten stimmt mit Temperaturrekonstruktionen überein, die für den europäischen Kontinent auf Basis von Pollenfunden am Institut für Paläontologie der Universität Bonn durchgeführt wurden. Da die klimatischen Verhältnisse für die Vegetationszusammensetzung einer Region verantwortlich sind, können durch Bestimmung der aufgetretenen Arten Abschätzungen der Temperaturverhältnisse vorgenommen werden. Ebenso wie in der Simulation ergeben sich für die Mehrzahl der Standorte in Europa dabei erhöhte Sommertemperaturen. Dieses Verhalten lässt sich direkt durch die erhöhte Einstrahlung

erklären. Allerdings treten in der Simulation auch auf der Nordhalbkugel Gebiete mit reduzierten Temperaturen auf. Dort wird der Einfluss der Einstrahlung durch andere Effekte überdeckt, beispielsweise Veränderungen in der atmosphärischen Zirkulation und dem damit verbundenen Feuchtigkeitstransport. Dies ist insbesondere in der zentralafrikanischen Region etwa im Bereich des 20-ten Breitengrads der Fall. Verantwortlich dafür ist eine erhöhte Wolkenbedeckung, die durch erhöhten Feuchtigkeitstransport als Folge verstärkter Winde aus Richtung des atlantischen Ozeans verursacht wird.

Für weite Teile der Nordhemisphäre werden geringere Wintertemperaturen simuliert, die somit ebenfalls konsistent auf die Veränderung der Einstrahlung reagieren. Allerdings sind auch in diesem Fall in bestimmten Regionen zusätzliche Effekte wirksam, die zu einer entgegengesetzten Temperaturreaktion führen können. So sind beispielsweise die Temperaturen über dem arktischen Ozean und angrenzenden kontinentalen Bereichen erhöht. Die Ursache liegt in der verringerten Meereisbedeckung, die durch die hohen Sommertemp

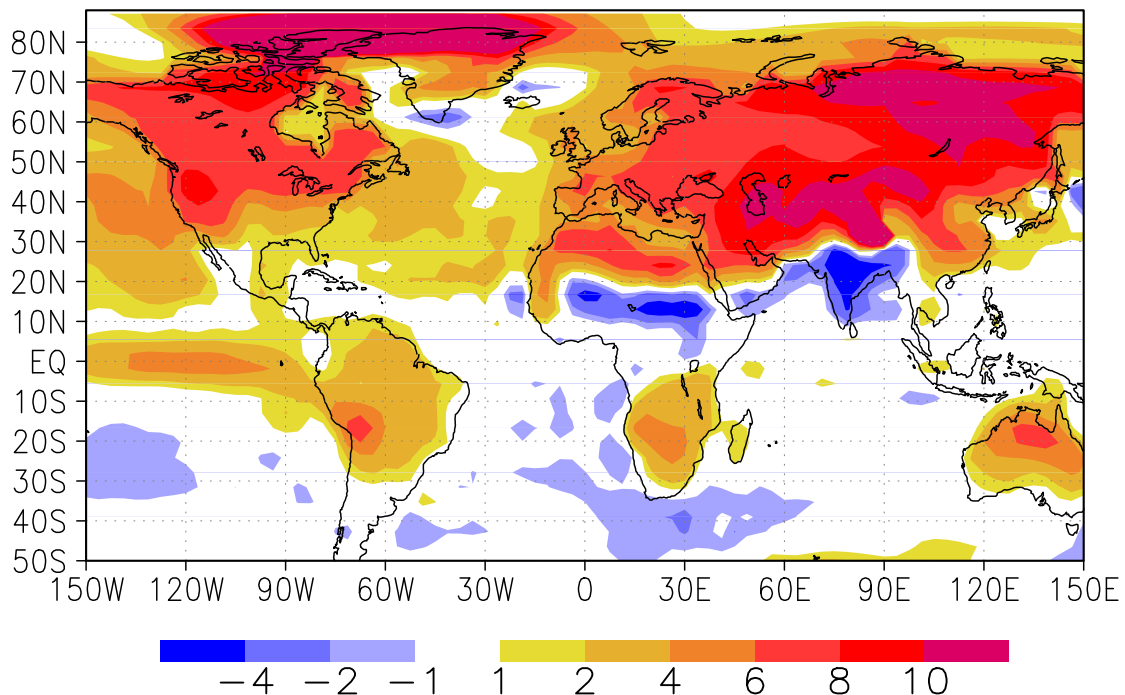
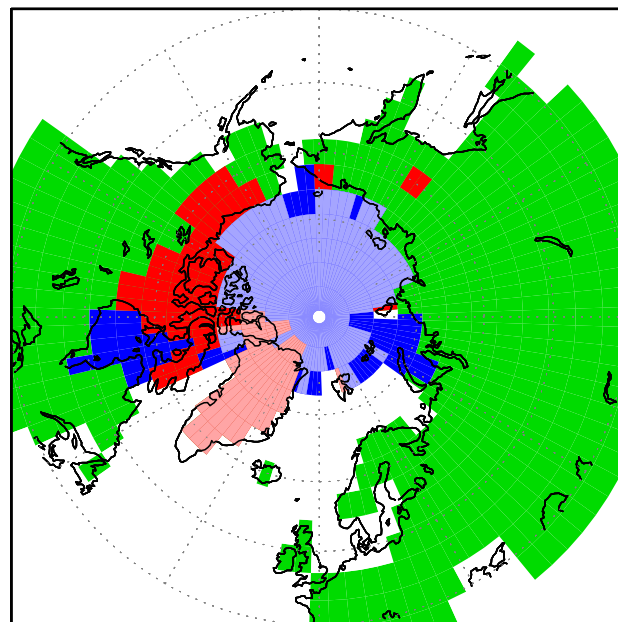


Abb. 4: Simulierte Sommertemperaturen während der Eem-Warmzeit (125 000 Jahre vor heute). Gezeigt ist die Abweichung der Temperatur von der Simulation mit vorindustriellen Bedingungen. Insbesondere über den Kontinenten der Nordhemisphäre treten erheblich höhere Temperaturen auf.



- schneebedeckte Gebiete in der vorindustriellen Simulation
- schneebedeckte Gebiete, ca. 115000 Jahre vor heute
- Meereisbedeckung in der vorindustriellen Simulation
- simulierte Meereisbedeckung, ca. 115000 Jahre vor heute
- Landgebiete des Klimamodells

Abb. 5:
Veränderung der Schneebedeckung und des Meereises in der Simulation für 115 000 Jahre vor heute, die das Ende der Eem-Warmzeit repräsentiert. Rote Flächen zeigen Landflächen, die ganzjährig mit Schnee bedeckt sind. Auf diesen Flächen sammelt sich immer mehr Schnee, wodurch langfristig ein Aufbau von Eismassen bewirkt wird. Die hellroten Flächen zeigen Flächen, die in der vorindustriellen Simulation ganzjährig mit Schnee bedeckt sind. Die dunkelroten Flächen sind am Ende der Eem-Warmzeit zusätzlich mit Schnee bedeckt. Weite Teile des nördlichen Kanada sind zu diesem Zeitpunkt ganzjährig mit Schnee bedeckt. Die blauen Gebiete zeigen Meeresregionen, die ganzjährig zu mindestens 50% mit Eis bedeckt sind. Auch hier zeigen die hellblauen Gebiete den vorindustriellen Fall und die dunkelblauen Gebieten die zusätzlichen Flächen am Ende der Eem-Warmzeit. Die grünen Flächen zeigen die Landflächen des Klimamodells, über denen keine ganzjährige Schneebedeckung auftritt.

eraturen verursacht wird. Die simulierten Differenzen in der Wintertemperatur über Europa zeigen ein stark ausgeprägtes Muster. Die Temperaturen im skandinavischen Raum sind erheblich höher, im Bereich Süd-West-Europas aber geringer als in der vorindustriellen Vergleichssimulation. Diese Struktur der Wintertemperaturen wird ebenfalls durch die pollen-basierten Temperaturrekonstruktionen der Universität Bonn bestätigt. Neben den Veränderungen der Eisbedeckung ist für diese Struktur eine Verstärkung der nach Osten gerichteten Winde verantwortlich, die durch den Transport ozeanischer Wärme zu den erhöhten Temperaturen in Nord-Ost-Europa beitragen.

Insgesamt zeigt sich also, dass das Modelle für Sommer und Winter ein Temperaturmuster simuliert, das mit Temperaturdaten überein-

stimmt, die aus Pollenfunden abgeleitet wurden. Dies legt die Schlussfolgerung nahe, dass das Modell in der Lage ist, realistische Temperaturverteilungen für die Eem-Warmzeit zu berechnen und dass die Veränderungen der Erdbahnparameter die Ursache für diese Verteilungen sind. Gleichzeitig erlaubt das Klimamodell, die Mechanismen zu verstehen, die für die aus den Pollenfunden rekonstruierten Temperaturen verantwortlich sind.

Die Simulation mit den Erdbahnparametern des Zeitpunkts 115 000 Jahre vor heute repräsentiert das Ende der Eem-Warmzeit und den Übergang in die darauffolgende Kaltphase. Das Modell reagiert in dieser Simulation mit einem langfristigen Abkühlungstrend. Während der 3000-jährigen Simulation tritt eine kontinuierliche Verminderung der globalen Mitteltemperatur auf. Mit diesem Trend geht eine

kontinuierliche Zunahme des arktischen Meereseis und eine Ausdehnung der ganzjährig schneebedeckten Flächen in Nordamerika einher (Abb. 5). Während der 3000 Jahre werden 892 000 km³ Wasser als Schnee auf dem nordamerikanischen Kontinent akkumuliert. Die Akkumulationsrate nimmt während der Simulation zu und entspricht am Ende der Simulation einer Reduktion des globalen Meeresspiegels von 18 cm pro Jahrhundert. In Übereinstimmung mit geologischen Erkenntnissen setzt die Ausbreitung der schneebedeckten Flächen im Modell im Nordosten Kanadas ein. Das Modell erlaubt eine Analyse der Ursachen der Schneeakkumulation. Die verminderte Sommereinstrahlung führt zu reduzierten Temperaturen u.a. über Nordamerika. Dort sinken die Temperaturen auf ein Niveau, das zunächst in den nord-östlichen Regionen eine ganzjährige Schneebedeckung erlaubt (Abb. 6). Von dort breiten sich die schneebedeckten Gebiete weiter aus. Durch die verminderten Temperaturen fällt ein höherer Anteil des Niederschlags als Schnee. Obwohl die absolute Niederschlagsmenge in dieser Region abnimmt, tritt dadurch eine Zunahme des Schneefalls auf. Auch für diese Simulation zeigt sich, dass wesentliche Merkmale des Übergangs von der Warm- in die Kaltphase wiedergegeben werden und auch in diesem Fall die Veränderung der Erdbahnparameter ausreichend ist, um diese Verhaltensweisen auszulösen.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass das Klimamodell in der Lage ist, wesentliche Merkmale der vergangenen Warmzeit und des Übergangs in die Kaltzeit wiederzugeben.

Durch derartige Tests wird das Vertrauen in die Klimamodelle erhöht, da sie auch für Phasen mit sehr unterschiedlichen Einstrahlungsbedingungen zuverlässige Ergebnisse liefern. Die Analyse zeigt außerdem, dass die Veränderung der Erdbahnparameter in beiden Fällen als Auslöser ausreichend ist. In diesen Untersuchungen wurden allerdings nur die Komponenten Ozean, Meereis und Atmosphäre berücksichtigt. Zur Zeit wird intensiv an der Entwicklung sogenannter Erdsystemmodelle gearbeitet, die zusätzliche Komponenten, wie beispielsweise Modelle der Vegetationsdynamik oder des Kohlenstoffkreislaufs enthalten und somit die Analyse zusätzlicher Wechselwirkungen im System Erde erlauben.

Literatur:

- EPICA community members: Eight glacial cycles from an Antarctic ice core. *Nature*, 429, No. 6992, 623-628, 2004.
- Herterich, K.: Variabilität der Erdbahnparameter und Klimaänderungen, *promet* 28, Nr. 3/4, 117-122, 2002.
- Kaspar, F., Cubasch, U.: Simulations of the Eemian interglacial and the subsequent glacial inception with a coupled ocean-atmosphere general circulation model. In: F. Sirocko, T. Litt, M. Claussen, M.F. Sánchez-Goñi (Hrsg.): *The climate of past interglacials*. Elsevier, 2006.
- Kaspar, F., Kühl, N., Cubasch, U., Litt, T.: A model-data comparison of European temperatures in the Eemian interglacial, *Geophysical Research Letters* 32, L11703, 2005.
- Kukla, G.J., u.a.: *Last Interglacial Climates*, *Quaternary Research* 58, Nr. 1, 2-13, 2002.
- Milankovich, M.: *Astronomische Mittel zur Erforschung der erdgeschichtlichen Klimate*, *Handbuch der Geophysik* 9, Berlin, 593-698, 1938.

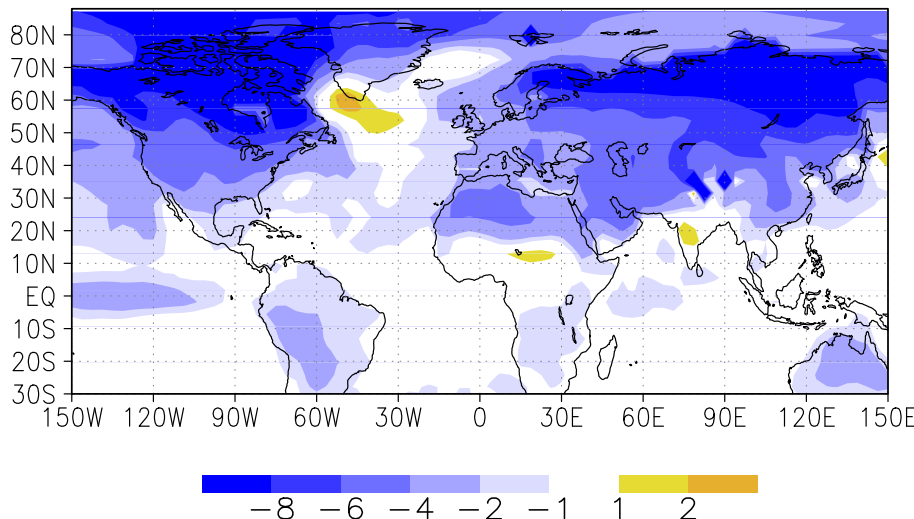


Abb. 6: Simulierte Sommertemperaturen am Ende der Eem-Warmzeit (115 000 Jahre vor heute). Gezeigt ist die Abweichung der Temperatur von der Simulation mit vorindustriellen Bedingungen. Die deutlich geringere Einstrahlung auf der Nordhemisphäre während der Sommermonate ist für deutlich verminderte Temperaturen verantwortlich.