

## Neues aus der Vergangenheit – Klimasimulationen über die letzten 1200 Jahre

Eine zentrale Herausforderung in der Klimaforschung ist die Unterscheidung zwischen der natürlichen Klimavariabilität und dem von Menschen beeinflussten Klimawandel. Um diese Faktoren voneinander abzugrenzen, ist es erforderlich, die Rolle von sogenannten externen Antrieben – Änderungen in der Sonneneinstrahlung, Vulkanausbrüche oder Landnutzungsänderungen – sowie die interne Variabilität des Klimas zu verstehen.

Dabei kann ein Blick in die Vergangenheit entscheidend helfen. Den historischen Zeitraum der letzten 1200 Jahre hat eine Forschungsgruppe um Dr. Johann Jungclaus am Max-Planck-Institut für Meteorologie (MPI-M) im Rahmen des Projekts „Millennium“ untersucht. Erstmals wurden Ensemble-Klimasimulationen über diesen Zeitraum mit einem vollständig interaktiven Kohlenstoffkreislauf durchgeführt. Dazu wurde das gekoppelte Erdsystemmodell MPI-ESM verwendet; bisher wurden solche komplexen Modelle nur für Simulationen auf der Zeitskala des aktuellen anthropogen beeinflussten Klimawandels oder für Projektionen in die Zukunft benutzt.

Die Ergebnisse lassen nicht nur Rückschlüsse darauf zu, welchen Anteil am Klimageschehen die oben genannten externen Antriebe in der Vergangenheit hatten, sondern unterstreichen auch, wie entscheidend der Mensch das Klima des 20. und 21. Jahrhunderts beeinflusst hat. Die Einbeziehung des Kohlenstoffkreislaufs ermöglicht es, nicht nur den Einfluss von CO<sub>2</sub>-Variationen auf die Klimaentwicklung zu beschreiben, sondern auch die Ursachen für natürliche Schwankungen der Treibhausgaskonzentrationen besser zu verstehen.

Warum simuliert man das Klima des letzten Jahrtausends? „Das letzte Jahrtausend („Millennium“) ist die am besten dokumentierte Phase der Klimageschichte, in der natürliche Schwankungen auf einer Skala von Jahrhunderten stattgefunden haben. Während des sogenannten Mittelalterliche Klimaoptimums (in Europa ca. 900 - 1250) besiedelten norwegische Siedler die Westküste Grönlands. Die Kleine Eiszeit (ca. 1400-1850) wurde sogar von niederländischen Malern in ihren Gemälden von zugefrorenen Grachten und darauf Schlittschuh laufenden Menschen festgehalten“, erklärt Projektkoordinator Dr. Johann Jungclaus. Da die Rekonstruktionen des vergangenen Klimas mit wachsendem Zeitabstand aber auf immer spärlicheren Daten beruhen, konzentriert sich die Arbeitsgruppe auf das letzte Millennium, um die zugrunde liegenden Prozesse und Rückkopplungsmechanismen besser zu verstehen.

Erstmals waren wir in der Lage, mit einem derart komplexen Modell mehrere Realisierungen von Experimenten mit zeitlich variablen Antriebsgrößen von 800 bis 2005 zu rechnen, um damit die Rolle der internen Variabilität besser einschätzen zu können“ erklärt Johann Jungclaus. Dabei bilden die Experimente mit jeweils gleichen Antrieben ein sogenanntes Ensemble. Um Unsicherheiten in der Größe des solaren Antriebs zu berücksichtigen, führen wir ein Ensemble (E1) mit einem relativ schwachen und ein weiteres Ensemble mit stärkerer Änderung der solaren Einstrahlung (E2) durch. Zudem haben wir sogenannte Sensitivitätsexperimente durchgeführt, in dem jeweils nur ein Antrieb (z.B. nur Vulkane) benutzt wurde.“

Zu welchen Ergebnissen kommt die Forschergruppe? Zunächst hat sie gezeigt, dass das Modell in der Lage ist, die wichtigsten Aspekte der aktuellen Periode des globalen Klimawandels zu reproduzieren (Abb. 1). Die simulierten Temperaturentwicklungen für die Nordhemisphäre stimmen über das 20. Jahrhundert gut mit den gemessenen Daten überein. Sowohl die beobachtete als auch die modellierte Zeitreihe zeigen einen Erwärmungstrend von 0.6°C über das 20. Jahrhundert mit multidekadischer Variabilität. Der zurzeit

diagnostizierte Klimawandel der letzten 150 Jahre mit seiner globalen Erwärmung kann nach diesen Berechnungen nicht allein durch Änderung der solaren Einstrahlung oder der internen Variabilität erklärt werden, sondern erst unter Berücksichtigung des menschlichen Einflusses (Kohlendioxid-Emissionen).

Insgesamt folgen die Ensemblesimulationen den Rekonstruktionen des vergangenen Klimas (Abb. 1). Die langfristigen Temperaturänderungen für die Nordhalbkugel sind deutlich größer als die Schwankungsbreite, die allein durch interne Variabilität erklärt werden kann. Modulation in der solaren Einstrahlung und Vulkanausbrüche hinterlassen deutliche und nachhaltige Spuren in der Klimageschichte. Besonders starke Fluktuationen treten dann auf, wenn Vulkanausbrüche gehäuft auftreten (z.B., am Anfang des 19. Jh.) oder sich solarer und vulkanischer Antrieb überlagern (z.B. in der Mitte des 15. Jh.)

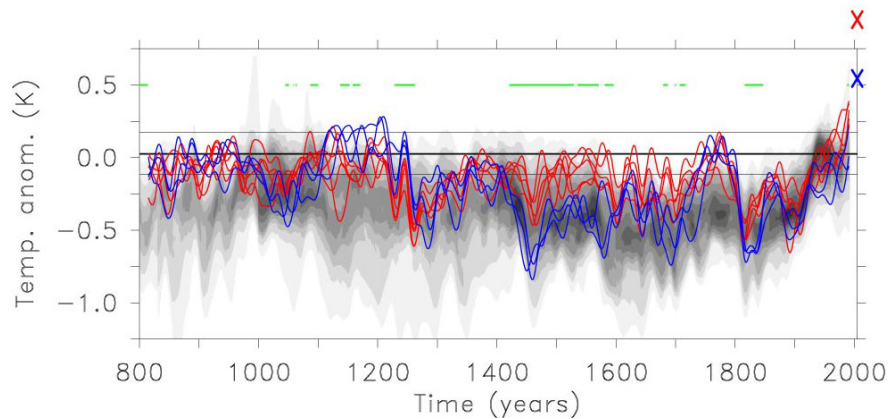


Abb. 1: Entwicklung der simulierten Temperatur über die letzten 1200 Jahre: Bodennahe Lufttemperatur der Nordhemisphäre als Abweichung zum Mittelwert der Jahre 1961-1990 für das Ensemble E1 (rot) und E2 (blau) im Vergleich zu den Rekonstruktionen (grau). Die Intensität der Grauschattierung ist ein Maß für die Übereinstimmung verschiedener Rekonstruktionen. Die schwarzen horizontalen Linien zeigen den Mittelwert des Kontrollexperiments und eine Abschätzung seiner Schwankungsbreite (5-95%- Bereich der Verteilung). Die grünen Balken zeigen an, wo die Ensembles nicht überlappen. Die Zeitreihen sind geglättet mit einem 31-jährigen laufenden Mittel.

In beiden Ensemblesimulationen treten die höchsten vorindustriellen Temperaturen um 1050-1250 und im späten 18. Jahrhundert auf, während die kältesten Perioden im frühen 16. Jh. und frühen 18. Jh. während der sog. Kleinen Eiszeit liegen. Im Gegensatz zu den E1-Experimenten, zeigen die E2-Modellläufe ein deutlicheres Mittelalter-Optimum, welches mit einem Maximum im solaren Antrieb im 12. Jahrhundert zusammenhängt. Neben den Unterschieden der beiden Ensembles zwischen 1400 und 1600 gibt es auch beachtliche Variationen innerhalb eines Ensembles.

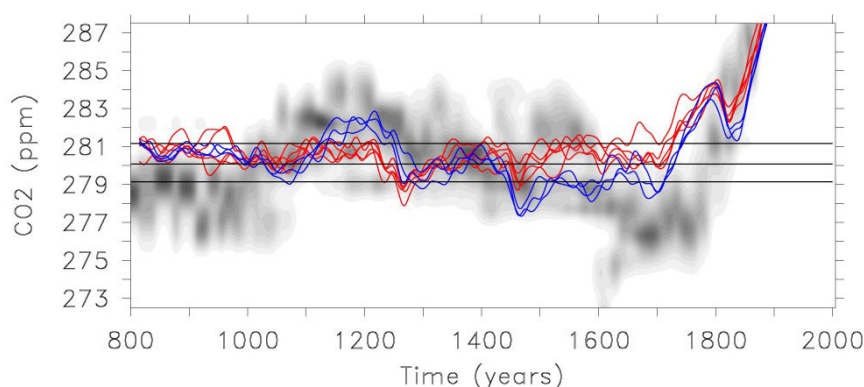


Abb. 2: CO<sub>2</sub>-Konzentrationen (31-jähriges laufendes Mittel) von Ensemble E1 (rot) und E2 (blau) im Vergleich zu Eisbohrkernrekonstruktionen (grau).

Vorindustrielle Schwankungen in der CO<sub>2</sub>-Konzentration im letzten Millennium sind verglichen mit den Schwankungen zwischen den Eis- und Warmzeiten, die etwa 100 ppm ausmachen, sehr klein. Eisbohrkerndaten zeigen jedoch eine Abnahme des CO<sub>2</sub>-Gehalts vom Mittelalter-Optimum bis zur Kleinen Eiszeit. Während das Modell den modernen Verlauf der CO<sub>2</sub>-Entwicklung mit seinem starken Anstieg ab dem 19. Jh. gut wiedergibt, bleiben die langfristigen Schwankungen in der vorindustriellen Zeit geringer als die aus Eisbohrkernen gewonnenen Rekonstruktionen. Dies könnte entweder auf langfristige, mehrere tausend Jahre umfassende, natürliche Variationen hinweisen, die in unserer Simulation nicht dargestellt werden können, oder auf eine zu geringe Sensitivität des Kohlenstoffkreislaufes gegenüber Temperaturschwankungen.

Experimente mit nur einer Antriebskomponente geben Aufschluss über die Rolle dieser Faktoren für die historische Entwicklung von Klima und Kohlenstoffhaushalt. Detaillierte Studien beschäftigen sich mit der Rolle der Landnutzungsänderungen. Frühere Spekulationen, die Kleine Eiszeit sei eine Folge von großflächiger Wiederbewaldung, konnten nicht bestätigt werden. Die Landbiosphäre lieferte nennenswerte Beiträge zum Klimawandel erst mit der stark zunehmenden Landwirtschaft seit dem 18. Jh. (Pongratz et al., 2009).

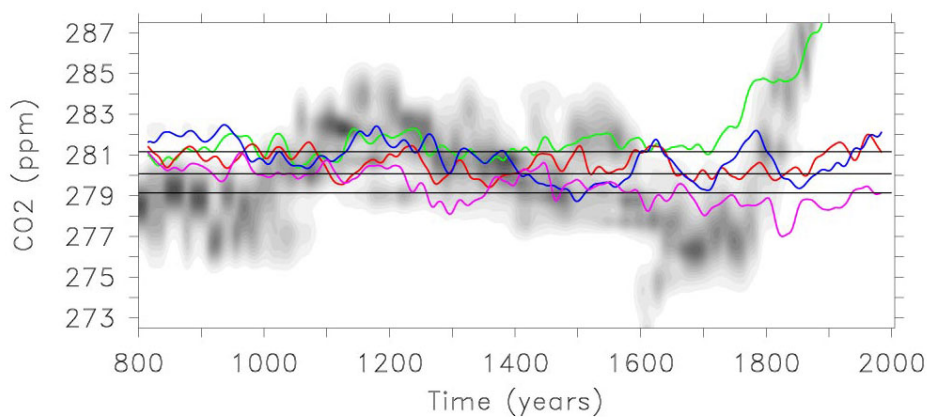


Abb. 3: Entsprechende CO<sub>2</sub>-Konzentrationen aus Experimenten mit nur einem Antrieb: Standardsolareinstrahlung (rot), starker solarer Antrieb (blau), Landnutzungsänderung (grün) und vulkanische Aerosole (violett).

Die externen Antriebe Solarstrahlung, Vulkane und Landnutzung haben ebenfalls Einfluss auf den CO<sub>2</sub>-Haushalt sowie auf die CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Atmosphäre, wie man an den Experimenten mit einzelnen Antrieben ablesen kann (Abb. 3). Während das E2-Ensemble generell niedrige CO<sub>2</sub>-Konzentrationen während der Kleinen Eiszeit zeigt (Abb.2.), kann der Abfall im frühen 17. Jahrhundert nicht mit dem solaren Antrieb in Zusammenhang gebracht werden (positive Anomalie der blauen Linie um 1610).

Brovkin et al. (2010) untersuchen speziell die Reaktion des Kohlenstoffkreislaufes auf die besonders heftige Vulkaneruption in der Mitte des 13. Jahrhundert (Abb. 3, violette Linie). Die Autoren weisen nach, dass besonders die tropische Landvegetation bzw. die verstärkte Aufnahme durch die Böden für den Abfall des atmosphärischen CO<sub>2</sub> Gehaltes verantwortlich ist.

Fazit: Ensemblerechnungen sind notwendig, um die interne Variabilität innerhalb des Klimasystems vollständig beschreiben zu können. Verschiedene Realisierungen des vergangenen Millenniums mit unterschiedlichen externen Antrieben (Solarstrahlung, Vulkanismus, Landnutzung) in diesen Ensembleläufen ermöglichen es, die Anteile der einzelnen Antriebe für das Klimasystem zu bestimmen. Für die Erklärung der langfristigen Klimaänderungen der letzten 1000 Jahre (Mittelalter-Optimum, Kleine Eiszeit) braucht man sowohl die interne Variabilität als auch die externen Antriebe. Weiterhin ist es möglich, mit diesen

Rekonstruktionen die Rolle der sich entwickelnden Landwirtschaft für das vorindustrielle Klima zu quantifizieren (Pongratz et al., 2009).

Die Simulationen des vergangenen Millenniums zeigen deutlich, dass der aktuelle Klimawandel nicht allein durch die interne Variabilität und den solaren Antrieb (Sonnenstrahlung) erklärt werden kann. Erst unter Berücksichtigung der anthropogenen Kohlendioxid-Emissionen kann der gemessene Temperaturanstieg reproduziert werden.

**Link zur Originalveröffentlichung:**

<http://www.clim-past.net/6/723/2010/>

J. H. Jungclaus, S. J. Lorenz, C. Timmreck, C. H. Reick, V. Brovkin, K. Six, J. Segschneider, M. A. Giorgetta, T. J. Crowley, J. Pongratz, N. A. Krivova, L. E. Vieira, S. K. Solanki, D. Klocke, M. Botzet, M. Esch, V. Gayler, H. Haak, T. J. Raddatz, E. Roeckner, R. Schnur, H. Widmann, M. Claussen, B. Stevens, and J. Marotzke: Climate and carbon-cycle variability over the last millennium. *Clim. Past*, 6, 723–737, 2010; doi: 10.5194/cp-6-723-2010

**Veröffentlichungen:**

Brovkin, V., Lorenz, S. J., Jungclaus, J. H., Raddatz, T., Timmreck, C., Reick, C., Segschneider, J., and Six, K.: Sensitivity of a coupled climate-carbon cycle model to large volcanic eruptions during the last millennium, published online, *Tellus*, 62B, 674-681; doi: 10.1111/j.1600-0889.2010.00471.x, 2010.

Pongratz, J., Reick, C. H., Raddatz, T., and Claussen, M.: Effects of anthropogenic land cover change on the carbon cycle of the last millennium, *Global Biogeochem. Cy.*, 23, GB4001, doi:10.1029/2009GB003488, 2009.

**Webseite des Projekts „Millennium“ am MPI-M:**

<http://www.mpimet.mpg.de/wissenschaft/interne-projekte/millennium.html#c6037>

**Kontakt:**

Dr. Johann Jungclaus  
Max-Planck-Institut für Meteorologie  
Tel.: +49 (0)40 41173 109  
E-Mail: [johann.jungclaus@zmaw.de](mailto:johann.jungclaus@zmaw.de)

Dr. Victor Brovkin  
Max-Planck-Institut für Meteorologie  
Tel.: 040 41173 339  
E-Mail: [victor.brovkin@zmaw.de](mailto:victor.brovkin@zmaw.de)

20. Dezember 2010