

WAS UNSERE KLIMAMODELLE AUS JAHRMILLIONEN KLIMAGESCHICHTE LERNEN KÖNNEN

28. PETERSEN EXZELLENZ-PROFESSUR 02/2023

Werner
Petersen
Stiftung

PROF. DR. KATRIN MEISSNER

Position:

Leiterin des Climate Change Research Centre,
University of New South Wales, Australien

Forschungsinteresse:

Entwicklung von Erdsystemmodellen zur Kopplung neuer Prozesse und Integration von Isotopen.



Seit der industriellen Revolution haben die Menschen ungefähr 680 Milliarden Tonnen Kohlenstoff ausgestoßen. Das hat dazu geführt, dass die Menge an Kohlenstoffdioxid (CO₂) in der Atmosphäre seit 1850 um über 40 Prozent gestiegen ist. Im Jahr 2022 erreichte die mittlere CO₂-Konzentration 418 ppm (parts per million). So hohe Werte gab es auf der Erde zum letzten Mal während einer Warmzeit vor etwa drei Millionen Jahren, im Pliozän, und die Welt sah damals ganz anders aus als heute. Unsere Vorfahren hatten gerade gelernt, sich auf zwei Beinen fortzubewegen und lebten in einem wesentlich wärmeren und feuchteren Klima. Moderne Menschen (homo sapiens) haben solch hohe CO₂-Konzentrationen noch nie erlebt.

Die Erdoberfläche hat sich seit 1850 bereits um 1,2°C erwärmt, was erhebliche Auswirkungen hat. Zum Beispiel schmelzen die Eisschilde in Grönland und der Antarktis, was zum Anstieg des Meeresspiegels beiträgt. Extreme Wetterereignisse wie Hitze, Dürren, Stürme und Starkregen nehmen rapide zu. Der Anstieg der atmosphärischen CO₂-Konzentration führt außerdem zur Versauerung und Sauerstoffverarmung der Ozeane. Der Klimawandel ist eine der größten Herausforderungen, denen die Menschheit je gegenübergestanden hat, und es ist nach wie vor unklar, wie gut Ökosysteme und Menschen sich in Zukunft an die schnellen Veränderungen anpassen werden können.

Um uns auf die Auswirkungen und Gefahren des Klimawandels vorzubereiten, vertrauen wir auf Projektionen von Klimamodellen. Diese Modelle wurden anhand unseres Wissens über das heutige Klima entwickelt. Sie werden getestet, in dem man ihre Ergebnisse mit aktuellen und historischen Beobachtungen vergleicht. In den letzten Jahrzehnten hat sich die Komplexität und Qualität dieser Modelle stark verbessert. Die Genauigkeit moderner Klimamodelle, das heutige Klima und die heutige Klimavariabilität zu simulieren, ist beeindruckend. Diese Modelle sind so komplex, dass sie viele Prozessoren und lange Rechenzeiten auf Großrechnern benötigen.

Klimamodelle sind jedoch nicht immer erfolgreich, wenn die Rahmenbedingungen stark vom heutigen Klima abweichen. Sie simulieren zum Beispiel einen relativ gleichmäßigen Klimawandel bis 2100 und darüber hinaus. Da das Klima in der Vergangenheit jedoch häufig durch plötzliche und schnelle Veränderungen geprägt war, ist es überraschend und beunruhigend, dass diese Modelle so stabil sind. Des Weiteren haben Simulationen vergangener Warmzeiten mit hohen CO₂-Konzentrationen alarmierende Mängel aufgezeigt. Im Vergleich zu Daten aus Klimaarchiven, wie zum Beispiel aus Sedimentbohrkernen, unterschätzen Klimamodelle in der Regel die Erwärmung in hohen Breiten, und in einigen Fällen sogar die Gesamterwärmung. Das ist problematisch, da eine Unterschätzung der zukünftigen Polarerwärmung beispielsweise dazu führen könnte, dass die Stabilität der kontinentalen Eisschilde über- und das Auftauen von Permafrostböden unterschätzt wird. Es ist also wahrscheinlich, dass einige wichtige Schlüsselprozesse in Klimamodellen noch nicht korrekt repräsentiert sind.

Glücklicherweise weist die Erdgeschichte ein breites Spektrum an verschiedenen Klimata auf, an denen wir unser Verständnis des Klimasystems verbessern und gleichzeitig unsere Modelle testen können. Dieser Ansatz erfordert eine enge Zusammenarbeit

zwischen Modellierern und Paläoklimatologen. Paläoklimatologen rekonstruieren Klimadaten der Vergangenheit, wie zum Beispiel Meeresspiegeln, Niederschlag oder CO₂-Konzentrationen, anhand von sogenannten „Proxies“, die sie aus natürlichen Klimaarchiven wie beispielsweise Eis- oder Sedimentbohrkernen gewinnen. Diese Proxies sind messbare Größen, die anhand einer Transferfunktion „übersetzt“ werden können. Zum Beispiel geben stabile Sauerstoffisotope (δ¹⁸O), die aus den Skeletten mariner Organismen gewonnen werden, einen Einblick in die Änderungen des Meeresspiegels. Sie sind aber auch von der damaligen lokalen Temperatur und δ¹⁸O-Zusammensetzung des Meerwassers, in dem diese Organismen gelebt haben, abhängig. Die Interpretation solcher Proxy-Daten ist aufgrund der Tatsache, dass jeder Proxy von mehreren Parametern beeinflusst wird, äußerst herausfordernd.

Wenn diese Proxies allerdings als aktive Tracer in Klimamodelle eingebaut werden, kann der Vergleich zwischen Modellen und Daten erleichtert werden. Ein solcher Vergleich ermöglicht es, dreidimensionale und dynamisch konsistente Darstellungen vergangener Klimata zu erstellen. Das ist wichtig, da die räumliche und zeitliche Erfassung von Proxy-Daten eher spärlich ist.

Katrin Meissner absolvierte ein Ingenieurstudium in Frankreich und im Senegal. Während ihrer Promotion am Alfred-Wegener-Institut entwickelte sie ein Atmosphären- und Meereismodell. Anschließend arbeitete sie als Postdoc und später als Assistant Professor an der University of Victoria in Kanada.

Seit 2009 ist sie an der University of New South Wales in Australien tätig, wo sie seit 2017 das Climate Change Research Centre leitet. Prof. Dr. Meissner hat grundlegende Arbeiten zur Entwicklung von Erdsystemmodellen erstellt, insbesondere zur Kopplung neuer Prozesse und Integration von Isotopen. Sie ist Fellow der Royal Society New South Wales und Mitglied des Expertengremiums der deutschen Exzellenzstrategie.

Variabilität im Quartär mit seinen Eiszeiten und Zwischeneiszeiten

Das Klima der Erde hat sich auch in Abwesenheit von menschlicher Aktivität geändert. Während der glazial-interglazialen Zyklen der letzten Million Jahre traten zum Beispiel drastische Erhöhungen von CO₂-Konzentrationen in der Atmosphäre und schnelle Erwärmungen innerhalb von Jahrzehnten und Jahrhunderten auf. Es gab beispielsweise Episoden in den letzten 60.000 Jahren, in denen die lokalen Temperaturen innerhalb von Jahrzehnten um 8-15°C mit Raten von bis zu 1°C pro Jahrzehnt anstiegen. Das Gleiche gilt für Treibhausgaskonzentrationen, mit Episoden, die durch schnelle Anstiege von CO₂ von 10-15 ppm, mit Raten von bis zu 0,15 ppm pro Jahr, gekennzeichnet sind.

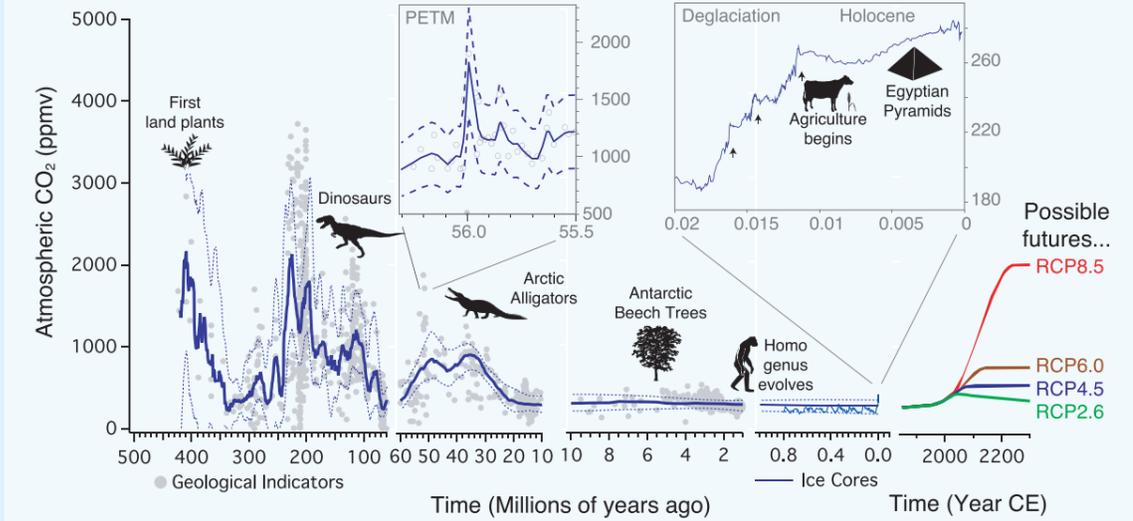
Obwohl das Klima während dieser jüngsten Erdgeschichte kälter war als heute, können wir viel über die Dynamik und Rückkopplungseffekte zwischen den verschiedenen Komponenten des Klimasystems aus dieser Zeit lernen. Klimavariabilität während des Quartärs (die letzten 2,6 Millionen Jahre) ging einher mit Änderungen der atmosphärischen Zirkulation und der Meeresströmungen, sowie Änderungen des kontinentalen Eisvolumens und des Meeresspiegels. Außerdem führten Änderungen in der Biogeochemie der Ozeane und der Vegetation auf Kontinenten zu Änderungen im Kohlenstoffkreislauf und somit der Treibhausgaskonzentrationen. Diese Zeit der Erdgeschichte ist daher eine wichtige und ergiebige Testumgebung für unsere Klimamodelle.

Bislang sind moderne Klimamodelle nur eingeschränkt in der Lage, das Auftreten, die Größe und die Muster dieser Variabilität zu simulieren. Obwohl das Klima der Erde offensichtlich sehr sensibel auf geringfügige Veränderungen von Faktoren wie Änderungen der Umlaufbahnparameter reagiert, erfordern Klimamodelle generell deutlich größere Störungen, um plötzliche Veränderungen nachzubilden. Es ist daher notwendig zu untersuchen, ob Klimamodelle die entscheidenden Komponenten, die bei vergangener Klimavariabilität eine wichtige Rolle gespielt haben, angemessen berücksichtigen. Zum Beispiel arbeiten mehrere Arbeitsgruppen zurzeit an einer besseren Darstellung der Kopplung zwischen Eisschelfen und dem Ozean und der Kopplung dynamischer Kontinentaleismodelle an Klimamodelle. Außerdem ist der Kohlenstoffkreislauf in den meisten Modellen noch recht primitiv oder gar nicht dargestellt, und vor allem im Ozean stark vereinfacht. Besonders wichtig sind hier Rückkopplungen, die mit Kohlenstoffreservoirs verbunden sind, die leicht CO₂ von der Atmosphäre aufnehmen und auch wieder an die Atmosphäre abgeben können. Zum Beispiel Kohlenstoff in den Regionen des Ozeans, die durch Veränderungen in der Zirkulation belüftet werden können, oder Kohlenstoff in oberflächennahen Böden oder in der Vegetation. Ein Klimamodell, das in der Lage ist, diese frühere Variabilität erfolgreich nachzubilden, ist offensichtlich verlässlicher für die Erstellung von zukünftigen Klimaprojektionen als ein Modell, das dies nicht leisten kann.

Auf Zeitreise in eine heiße, treibhausgasreiche Vergangenheit

Bei den aktuellen Emissionsraten werden wir voraussichtlich in den nächsten zehn Jahren die Treibhausgaskonzentrationen des Pliozäns überschreiten und uns auf atmosphärische CO₂-Konzentrationen zubewegen, die es seit dem Mittleren Miozän-Klimaoptimum (vor 17 bis 14,7 Millionen Jahren) nicht mehr gegeben hat. Das Mittlere Miozän-Klimaoptimum war ein warmes Intervall mit ungefähr 7°C höheren globalen Durchschnittstemperaturen und wesentlich wärmeren Temperaturen in hohen Breitengraden. Atmosphärische CO₂-Konzentrationen betragen zwischen 450-600 ppm. Falls aber die Menschheit auch in Zukunft weiterhin ungebremst Treibhausgase ausstößt und dem Schlimmstfall-Szenario des IPCC-Reports, dem „Shared Socioeconomic Pathway (SSP) 5-8.5“, folgt, dann katapultieren wir den Planeten zurück in ein Klima, das es zuletzt während des frühen Eozäns (vor ungefähr 53 bis 51 Millionen Jahren) gab, mit CO₂-Konzentrationen im Bereich von 900-1900 ppm.

Es gab also Zeiträume in der Klimageschichte, die uns Aufschlüsse geben können, wie unsere Zukunft ungefähr aussehen könnte, je nachdem, welchen Weg der Dekarbonisierung wir einschlagen werden. Allerdings werden die Proxies, mit denen wir diese Klimata rekonstruieren können, immer spärlicher und auch unpräziser, je weiter wir in die Vergangenheit zurückblicken. Auch hier kann die Zusammenarbeit zwischen Paläoklimatologen und Klimamodellierern helfen, uns ein dreidimensionales Bild



VERÄNDERUNGEN DER ATMOSPHERISCHEN CO₂-KONZENTRATION DER LETZTEN 500 MILLIONEN JAHRE

Die eingefügten Abbildungen zeigen Zeiträume mit bemerkenswerten Kohlenstoffkreislaufdynamiken: das Paläozän-Eozän-Temperaturmaximum (PETM), die Deglaciation am Ende des letzten Glazials und das Holozän - die Zeit relativ stabiler CO₂-Werte und Klimabedingungen, in der die menschliche Landwirtschaft und Besiedlung begannen. Mögliche zukünftige CO₂-Veränderungen, basierend auf dem IPCC AR5 Report, sind ebenfalls dargestellt. Obwohl die CO₂-Werte, die im kommenden Jahrhundert erreicht werden könnten, in der Erdgeschichte nicht beispiellos sind, sind sie dem Homo Sapiens völlig unbekannt und waren mit deutlich anderen Lebensräumen und Klimabedingungen verbunden. Es ist auch bemerkenswert, dass selbst die schnellen CO₂-Anstiege - während des PETMs und der letzten Deglaciation - mindestens eine Größenordnung langsamer waren als die aktuelle Rate des anthropogenen CO₂-Anstiegs. Quelle: Meissner et al., ERL, 2021.

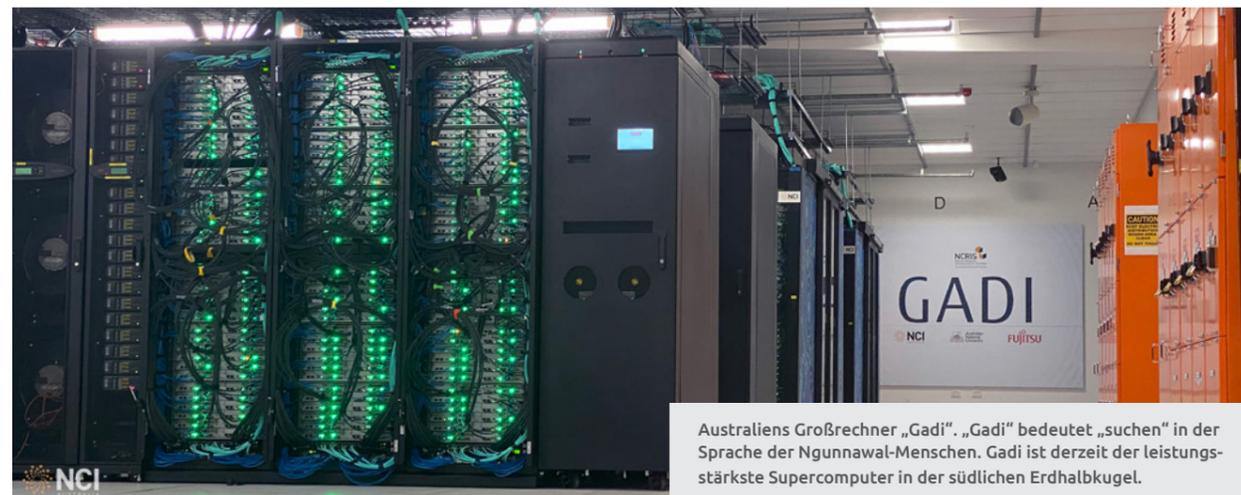
zu verschaffen. Ein weiteres Problem ist, dass der heutige Anstieg von CO₂-Konzentrationen so rasant voranschreitet, dass das Klimasystem gar keine Zeit hat sich an diese schnellen Änderungen im Energiehaushalt anzugleichen, es hinkt immer hinterher. Das liegt vor allem an der Trägheit des Ozeans und der Eisschilde, die hunderte bis tausende von Jahre brauchen, um unter anderen Rahmenbedingungen ein neues Gleichgewicht zu finden. Unser Zukunftsklima wird somit nicht im Gleichgewicht sein. Klimaepisoden der Vergangenheit mit hohen Treibhausgaskonzentrationen waren hingegen im Gleichgewicht. Den Unterschied kann man bereits bei heutigen CO₂-Konzentrationen erkennen. Zum Beispiel war es vor 3 Millionen Jahren wesentlich wärmer als heute und der Meeresspiegel war um mehrere Meter höher, obwohl die atmosphärischen CO₂-Konzentrationen vergleichbar waren. Ein direkter Vergleich zwischen Vergangenheit und Zukunft hinkt deswegen, obwohl diese Klimaepisoden uns natürlich einen Einblick auf das Gleichgewichtsklima geben können, das die Erde dann letztendlich erreichen wird.

Wenn Wissenschaftler vergangene wärmere Klimaperioden mit Klimamodel-

len simulieren und diese Ergebnisse mit Proxies vergleichen, dann ist der Temperaturunterschied zwischen den Polarregionen und den Tropen zu groß. Das bedeutet, dass die hohen Breitengrade in den Modellen zu kalt sind. Ansatzweise bemerkt man dieses Problem auch im heutigen Klima: Wenn Modelle den Klimawandels der letzten Jahrzehnte simulieren, unterschätzen sie die Erwärmung der Arktis. Das zeigt, dass es noch Lücken in unserem Verständnis wichtiger Prozesse im Klimasystem gibt. Zum Beispiel wissen wir noch nicht genug über polare stratosphärische Wolken. Es gibt auch Hinweise darauf, dass es in vergangenen warmen Klimaperioden großflächige Sauerstoffmangelgebiete im Ozean gab, die in einigen Fällen sogar zu toxischen Bedingungen führten. Auch hier haben unsere Modelle Probleme, wenn sie diese lang vergangenen Klimaepisoden simulieren und auch hier unterschätzen sie die bereits beobachtete Sauerstoffverarmung der Ozeane in den letzten Jahrzehnten.

Fazit: Die Klimavariabilität der Erdgeschichte zu untersuchen ist ein spannendes Thema, das uns viel über das hochkomplexe Klimasystem lehren kann. Wir können herausfinden, wie

Mechanismen funktionieren, die wir heute nicht genau vorhersagen können, die aber eine Rolle spielen werden, wenn die Erde sich in Zukunft weiter erwärmt. Wenn wir auf lange Zeiträume schauen, sehen wir, dass Klimamodelle, die nur die Atmosphäre und den Ozean berücksichtigen, nicht ausreichen. Wir müssen auch die Wechselwirkungen zwischen dem Ozean, der Atmosphäre und den Eisschilden sowie biogeochemische Prozesse auf dem Land und im Ozean berücksichtigen. Erdsystemmodelle berücksichtigen mehr Prozesse als die klassischen Klimamodelle, die zurzeit zur Erstellung von Klimaprojektionen für das 21. Jahrhundert verwendet werden. Allerdings ist die Auflösung von Erdsystemmodellen meist unzureichend, um kleinskalige Prozesse gut darzustellen, die natürlich auch sehr wichtig sind. Hier stoßen wir auf die Grenzen der Rechenleistung moderner Großrechner. Vielleicht können wir aber in Zukunft auch andere Ansätze nutzen, wie zum Beispiel hybride Modelle, die mit Hilfe von künstlicher Intelligenz einige dieser Prozesse auch in hochauflösenden Modellen berücksichtigen könnten.



Australiens Großrechner „Gadi“. „Gadi“ bedeutet „suchen“ in der Sprache der Ngunnawal-Menschen. Gadi ist derzeit der leistungsfähigste Supercomputer in der südlichen Erdhalbkugel.