

Das Rätsel der Eiszeiten – Teil XII: GCM V – Wie enden Eiszeiten?



Im Teil XI betrachteten wir das Ende der letzten Eiszeit. Hauptsächlich haben wir Shakun et al. (2012) begutachtet, die einige sehr interessante Daten über das Timing der Temperaturen in der Süd- und der Nordhemisphäre gezeigt haben – zusammen mit atmosphärischen CO₂-Werten. Kurz gesagt: Die Südhemisphäre begann sich zu erwärmen, kurz danach stiegen auch die CO₂-Werte, was zu einer positiven Rückkopplung des initialen Temperaturanstiegs führte, und die globalen Temperaturen folgten der Südhemisphäre:



*Bildinschrift: **CO₂-Konzentration und Temperatur. a:** Der globale Proxy-Temperaturblock (blau) als Abweichungen vom Mittel des frühen Holozäns (vor 11.500 bis 6500 Jahren), ein Komposit aus antarktischen Eisbohrkernen (rot) und die atmosphärische CO₂-Konzentration (gelbe Punkte). Gekennzeichnet sind das Holozän, das jüngere Dryas (YD), Bølling-Allerød (B-A), das Älteste Dryas (OD) und das Letzte Glaziale Maximum (LGM). Fehlerbalken, 1sigma (Methoden); parts per million by volume ppmv. **b:** Phasen der CO₂-Konzentration und der Temperatur global (grau), für die Nordhemisphäre (NH, blau) und die Südhemisphäre (SH, rot). Die Proxy-Blöcke basieren auf Verzögerungs-Korrelationen von vor 20.000 bis 10.000 Jahren in 1000 Monte-Carlo-Simulationen (Methoden). Das Mittel und die 1 \times -Bandbreite werden gezeigt. Die CO₂-Konzentration führt den globalen Temperaturblock in 90% der Simulationen und hinkt ihr hinterher in 6% aller Fälle (Aus Shakun et al. 2012, Abbildung 1).*

Diese Studie in *Nature* enthielt auch einige Modellierungs-Arbeiten, die ich in mancher Weise kritisiert habe, aber die Modellierung stand nicht im Mittelpunkt der Studie. Eric Wolff, einer der führenden Komitee-Mitglieder bei EPICA, teilte diese Kritik an der Modellierung, die dann in der gleichen Ausgabe von *Nature* veröffentlicht wurde.

Im vorliegenden Artikel wollen wir das paper von He et al. (2013) betrachten, ebenfalls in *Nature* veröffentlicht. Dabei handelt es sich um eine Studie über die Modellierung der gleichen Vorgänge. Einer der

Mitautoren ist Jeremy Shakun, der Leitautor unserer früheren Studie. Unter den Mitautoren waren auch Bette Otto-Bliessner, eine der Leitautorinnen im Kapitel zu Paläoklima im AR 5 des IPCC.

He et al. 2013

Leser, die diese Serie bis hier verfolgt haben, werden erkennen, dass das Abstract (aus dem wir unten zitieren) einige bekannte Features enthält:

Der Milankovitch-Theorie zufolge führten Änderungen der sommerlichen Einstrahlung in hohen nördlichen Breiten zu glazialen Zyklen infolge des Einflusses auf die Massenbilanz der Eisschilde. Statistische Analysen langer Klimareihen stützten diese Theorie, stellten aber auch eine substantielle Herausforderung dar, zeigten sie doch, dass Änderungen des Klimas auf der Südhalbkugel in Phase mit diesen auf der Nordhalbkugel waren oder diesen sogar vorausgingen.

*Obwohl ein orbital getriebenes Signal auf der Nordhemisphäre irgendwie auf die Südhalbkugel hätte übergreifen können, kann der Strahlungsantrieb das lokale Klima der Südhemisphäre auch direkt beeinflussen, potentiell verstärkt durch Rückkopplungen mit dem Meereis. Dies würde zeigen, dass die beiden Hemisphären unabhängig voneinander auf verschiedene Aspekte orbitaler Antriebe reagieren. Das Aufspüren von Signalen in Klimaaufzeichnungen kann zwischen diesen Bedingungen allerdings nicht unterscheiden, weil die vorgeschlagenen Strahlungsantriebe im Wesentlichen eine identische Variabilität aufweisen. Hier verwenden wir transiente (transient = zeitlich veränderlich, Anm. der Redaktion) Simulationen mit einem gekoppelten allgemeinen Ozean-Atmosphäre-Zirkulationsmodell, um die Auswirkungen der Antriebe durch Änderungen des Orbits, der atmosphärischen CO₂-Konzentration, der Eisschilde und der AMOC auf die hemisphärischen Temperaturen während der ersten Hälfte der letzten Deglaziation (vor 22.000 bis 14.300 Jahren) zu identifizieren. Obwohl nur auf einem einzelnen Modell basierend, **stützt unsere Transient-Simulation mit ausschließlich orbitalen Änderungen die Milankovitch-Theorie, zeigt sie doch, dass die letzte Deglaziation durch zunehmende Einstrahlung im Frühjahr und Sommer in mittleren und hohen nördlichen Breiten initiiert worden ist** sowie durch terrestrische Schnee-Albedo-Rückkopplung.*

Weiter heißt es im Abstract:

Die Simulation mit allen Antrieben reproduziert am besten das Timing und die Größenordnung der Temperaturentwicklung auf der Südhalbkugel in den Proxy-Aufzeichnungen aus dieser Zeit.

Dies ist ein Modellergebnis ähnlich dem der Studie im [Teil IX](#), in der das gleiche Verfahren individueller „Antriebe“ und eine Simulation mit allen „Antrieben“ kombiniert angewendet wird. Ich habe „Antriebe“ in Anführungszeichen gesetzt, weil die Antriebe (Eisschilde, Treibhausgase und Schmelzwasserflüsse) tatsächlich Rückkopplungen sind, die zu simulieren die GCMs jedoch nicht in der Lage sind. Änderungen der AMOC, die mit einem orbital induzierten Rückzug der nordhemisphärischen Eisschilde verbunden sind, sind die plausibelste Erklärung für die frühe Erwärmung der Südhemisphäre und deren Führungsrolle über die Temperatur der Nordhemisphäre; der darauf folgende CO₂-Anstieg bedeutete die kritische Rückkopplung der globalen Deglaziation.

In **dieser** Studie gibt es die folgenden GCM-Simulationen:

- ORB (vor 22.000 bis 14.300 Jahren), getrieben nur durch kurzlebige Variationen der orbitalen Konfiguration
- GHG (vor 22.000 bis 14.300 Jahren), getrieben nur durch kurzlebige Variationen atmosphärischer Treibhausgas-Konzentrationen
- MOC (vor 19.000 bis 14.300 Jahren), getrieben nur durch kurzlebige Variationen von Schmelzwasserflüssen aus den Eisschilden der Nordhemisphäre und der Antarktis
- ICE (vor 19.000 bis 14.300 Jahren), getrieben nur durch quasi-kurzlebige Variationen der Orographie der Eisschilde sowie deren Ausdehnung aufgrund der ICE-5G (VM12)-Rekonstruktion.

Und dann gibt es da die ALL-Simulation, also eine Kombination all dieser Antriebe. Das verwendete GCM ist CCSM3 (CCSM4, eine aktualisierte Version von CCSM3, haben wir bereits im [Part X – GCM IV](#) dieser Reihe kennen gelernt). Der Idee dieser Studie ist es, ein paar Kernfragen zu beantworten. Eine davon lautet: Falls Änderungen der solaren Einstrahlung in hohen Breiten der Nordhemisphäre der Schlüssel zum Verständnis von Eiszeiten sind, warum hat sich dann die Südhemisphäre zuerst erwärmt? (Um diese Frage war es auch in Shakun et al. 2012 gegangen). Eine weitere Absicht dieses papers ist es, den tatsächlichen Temperaturanstieg während der jüngsten Deglaziation sowohl in der Nord- als auch in der Südhemisphäre nachzuvollziehen und zu simulieren.

Schauen wir mal.

Ihre erste Abbildung ist etwas schwierig zu lesen, aber die Essenz ist, dass blau das Modell mit ausschließlich orbitalem Antrieb (ORB) ist. Rot ist das Modell mit ALLEN Antrieben, und schwarz ist die Proxy-Rekonstruktion der Temperatur (an verschiedenen Stellen).



Bildinschrift: a. Einstrahlung am 21. Juni auf 60°N und atmosphärische CO₂-Konzentration.. b. Eustatischer Meeresspiegel. Zeitfehler-Balken ± 2s.d. c. Schmelzwasserflüsse der Nordhemisphäre (NHMW) in Metern pro Anstieg des Meeresspiegels in 1000 Jahren. d. Verhältnis Pa/Th bei Bermuda als Proxy für den AMOC-Export und Modell-Maximum des AMOC-Transports (unter 500 m). Sv Sverdrup (...). e. Grönland-SAT auf der Grundlage des GISP2-Eisbohrkerns und aus Simulationen (Modell-Offset durch -4,5°C) f bis i Regionale Wassertemperaturen im Südatlantik (f), dem Indischen Ozean (g), dem Südpazifik (h) und dem Ozean der Südhemisphäre (i). j Regionale SAT über der Antarktis. In d bis j: Schwarz: Rekonstruktion, Rot: Simulation ALL, blau: Simulation ORB (10-Jahres-Mittel). LGM = letztes glaziales Maximum. (Aus He et al. 2013, Abbildung 2).

Wir können sehen, dass der orbitale Antrieb allein fast keinen Einfluss auf irgendeinen der Haupt-Temperatur-Parameter hat, und wir können sehen, dass es in Grönland und der Antarktis unterschiedliche Temperaturverläufe in dieser Periode gab.

- Wir können sehen, dass ihr ALL-Modell vernünftig gearbeitet hat bei der Rekonstruktion der wesentlichen Temperaturtrends.
- Wir können auch sehen, dass es kaum die Temperatur-Fluktuationen im Zeitmaßstab von Jahrhunderten bis zu einem Jahrtausend abbilden konnte, wenn diese auftraten.

Als Beleg folgt hier die Grönland-Aufzeichnung aus NGRIP von vor 20.000 bis 10.000 Jahren:



Abbildung 3: – NGRIP data

Wir erkennen, dass die Haupterwärmung in Grönland (zumindest an dieser Stelle in Nordgrönland) vor etwa 15.000 Jahren erfolgt ist, während die Antarktis schon vor 18.000 Jahren eine signifikante Erwärmung erfuhr (vergleiche Abbildung 1 aus Shakun et al.). Das paper zeigt im Grunde, dass es infolge von zwei separaten Effekten zwei wesentliche Temperaturtrends erfassen kann:

1. Die „Abkühlung“ in Grönland von vor 19.000 bis 17.000 Jahren mit einer Erwärmung der Antarktis im gleichen Zeitraum – wegen der MOC.
2. Die fortgesetzte Erwärmung von vor 17.000 bis 15.000 Jahren in beiden Regionen infolge von Treibhausgasen.

Man beachte, dass meine eigenen NGRIP-Daten und ihre GISP-Daten einen unterschiedlichen Temperaturtrend zeigen, und ich weiß nicht warum. Zum Verständnis dessen, was das Modell zeigt – diese Daten stammen aus ihren Ergänzungs-Daten, gefunden auf der Website von *Nature*: Vor

19.000 bis 17.000 Jahren gab es in der Antarktis (AN) eine signifikante Erwärmung, während es in Grönland (GI) zu einer größeren Abkühlung gekommen war von vor 17.300 und 16.700 Jahren.



Bildinschrift: Abbildung S25: genau wie Abbildung 59, nur diesmal mit Temperaturänderungen von vor 19.000 und 17.000 Jahren. SAT-Unterschiede und deren Unsicherheiten (eine Standardabweichung) werden abgeleitet von vor 17.300 bis 16.700 Jahren für 17.000 Jahre; vor 19.300 und 18.700 Jahren für 19.000 Jahre für Proxies und die Simulationen ALL, ORB und GHG sowie zwischen vor 19.000 und 18.400 Jahren für 19.000 Jahre für die Simulationen ICE, MOC und SUM. Alle Modellvariablen sind jährliche Mittelwerte (Abbildung 4).

Man beachte, dass die MOC (gelb) die Simulation ist, die die Änderung sowohl in GI als auch in AN erzeugt. (SUM sind die addierten Werte der individuellen Läufe, während ALL die Simulation mit der Kombination aller Treiber ist). Zweitens, vor 17.000 bis 15.000 Jahren setzt sich die Erwärmung in der Antarktis fort, und auch in Grönland wird es wärmer:



Bildinschrift: Abbildung S27: Wie Abbildung 59, jedoch für Temperaturänderungen von vor 17.000 bis 15.000 Jahren. SAT Differenzen und ihre Unsicherheiten (1 Standardabweichung) sind zwischen 17.300 und 16.700 Jahre v.h. für 17.000 Jahre und für 14.700 für 15.000 Jahre abgeleitet. Alle Variablen wieder Jahresmittelwerte (Abbildung 5).

Man beachte, dass GHG (rosa) jetzt die Hauptursache für die Temperaturanstiege ist. Wir können die Temperaturtrends mit der Zeit als einen besseren Weg darstellen. Ich habe einige Anmerkungen hinzugefügt, weil das Layout sich mir nicht sofort erschlossen hat:



Bildinschrift: Abbildung 3: frühe deglaziale Erwärmung in Einzelantriebs-Transient-Simulationen. a-c. Grönland SAT (GISP2) (a), SHSST stack (b) und antarktischer SAT stack (c) in Simulation ORB. d-o, wie für a-c, aber für Simulation ICE (d-f), GHC (g-i), MOC (j-l) und ALL/SUM (m-o). Alle Variablen in 10-Jahresmittel. Proxy rekonstruktionen in schwarz. In a-l Simulationen in rot. In m-o Simulation ALL in rot und Simulation SUM in blau. LGM, Letztes glaziales Maximum (Abbildung 6).

Wie in Abbildung 1 können wir auch hier sehen, dass die Haupttrends ziemlich gut simuliert wurden, ohne das aber das Modell Variationen in kürzeren Zeiträumen erfassen konnte.

Die MOC kurz erklärt: Die MOC bringt warmes **Oberflächen**-Wasser aus den Tropen in hohe nördliche Breiten, die sich in der Folge erwärmen. Das **kalte** Wasser fließt in der Tiefe zurück, was eine wirklich große Zirkulation bildet. Wird diese Zirkulation gestört, fließt mehr warmes

Wasser zur Antarktis und wärmt diese (Die Antarktis weist eine ähnliche großräumige Zirkulation von den Tropen an der Oberfläche und einem kalten Rückfluss in der Tiefe auf), während sich das Nordpolargebiet abkühlt. Man nennt dies die **bipolare Wippe**.

Wenn man ein extrem großes Fass Süßwasser in den hohen Breiten auskippt, verlangsamt sich die MOC oder kommt ganz zum Stillstand. Dies liegt an der geringeren Dichte des Süßwassers, das nicht absinken kann, was die Zirkulation verlangsamt. Kommt es also in hohen nördlichen Breiten zu massivem Abschmelzen, fließt Süßwasser in den Ozean, was die MOC verlangsamt und die hohen nördlichen Breiten abkühlt, während sich die Antarktis erwärmt. Das jedenfalls zeigen ihre Modelle. Die verfügbaren Daten hinsichtlich der MOC stützen diesen Gedanken; hier folgt Teil d aus ihrer Abbildung 1 – die schwarze Linie kennzeichnet die Proxy-Rekonstruktion:



Abbildung 7: Die Einheiten links sind Volumen-Raten des zwischen den Tropen und hohen nördlichen Breiten fließenden Wassers.

Was hat der orbitale Antrieb in den Modellen bewirkt?

Falls wir nochmals ihre Abbildung 1 (unsere Abbildung 2) betrachten, erkennen wir in nichts eine Änderung als Ergebnis der ORB-Simulation. Das Abstract scheint also etwas verwirrend zu sein, wenn ihre Studie zeigt, dass Einstrahlung, sprich die Milankovitch-Theorie, das ist, was die ganze Kette der Ereignisse auslöst. In ihrer Abbildung 2 zeigen sie eine geographische Ansicht der **sommerlichen** Temperaturänderungen in hohen Breiten und den Polargebieten **als Ergebnis der ORB-Simulation**. Die initiale Zunahme der Einstrahlung im Frühjahr und Sommer in den mittleren und hohen Breiten der Nordhemisphäre vor 22.000 und 19.000 Jahren war etwa dreimal so hoch wie in der Südhemisphäre (Abbildungen 2a und 2b). Außerdem führt die Abnahme der Oberflächen-Albedo durch das Schmelzen von Schnee auf dem Festland in der Nordhemisphäre zu zusätzlicher Gesamt-Absorption der Sonneneinstrahlung in der NH. **Als Konsequenz werden die Sommer der Nordhemisphäre in der ORB-Simulation in der Arktis bis zu 2°C wärmer und bis zu 4°C wärmer in Eurasien**, mit einem Gesamt-Mittelwert in der NH von 0,9°C in mittleren und hohen Breiten (Abbildungen 2c und 2e).

In ihrem Modell betrifft dies nicht Grönland (aus mir unverständlichen Gründen). Sie behaupten:

Unsere ORB-Simulation stützt folglich die Milankovitch-Theorie, zeigt sie doch, dass eine substantielle sommerliche Erwärmung in der NH zum Ende des Letzten Glazialen Maximums erfolgte als ein Ergebnis der

größeren Einstrahlung im Frühjahr und Sommer in mittleren und hohen Breiten der NH sowie einer größeren Sensitivität der von Landmassen dominierten hohen nördlichen Breiten für den Antrieb durch Einstrahlung aus Schnee-Albedo-Rückkopplungen. **Diese orbital induzierte Erwärmung löste möglicherweise den Rückzug der Eisschilde auf der NH aus und half, den Rückzug beizubehalten während des ältesten Dryas.**

Analyse

1. Wenn wir die gleiche orbitale Simulation vor 104.000, 83.000 oder 67.000 Jahren laufen lassen (oder auch ein paar anderen Zeiten) – was würden wir bekommen? Hier folgen die Änderungen der Einstrahlung auf 60°N von vor 130.000 Jahren bis heute:



Abbildung 8.

Es ist keineswegs klar, was an dem Zeitraum von vor 21.000 bis 18.000 Jahren hinsichtlich der Einstrahlung so besonders ist. Es ist keine Überraschung, dass ein GCM einen lokalen Temperaturanstieg erzeugt, wenn lokal die Einstrahlung zunimmt.

2. Der in das Modell eingebrachte Schmelzwasser-Impuls ist nicht abgeleitet aus einer Berechnung irgendeiner Eisschmelze als Folge gestiegener Sommertemperaturen über Eisschilden, sondern ein künstlich angebrachter Antrieb. Unter der Bedingung, dass die Eisschmelze die MOC verlangsamt und daher die Temperatur in hohen Breiten abnimmt, sollte die MOC als eine negative Rückkopplung auf jedes Schmelzen von Schnee und Eis agieren.

3. Die Studie von Smith und Gregory (2012) [SG 2012], die wir in [Teil IX](#) besprochen haben, zeigt vielleicht andere Auswirkungen durch individuelle Antriebe als jene bei He et al. Weil der Zeitraum von vor 20.000 bis 15.000 Jahren bei Smith und Gregory etwas komprimiert ist, bin ich da nicht sicher. Man betrachte beispielsweise die Auswirkung allein auf Eisschilde während dieser Periode. Bei SG2012 zeigt sich ein deutlicher Effekt (gelb) über Grönland; bei He et al. zeigt sich gar nichts (Abbildung 6 oben)



Bildinschrift: Temperaturunterschiede in der Ostantarktis (oben) und Grönland (unten) zur präindustriellen Zeit (Aus Smith & Gregory 2012, Abbildung 9).

Schlussfolgerung

Es ist eine interessante Studie, die zeigt, dass Änderungen der großräumigen Meeresströme zwischen den Tropen und den Polen (die MOC) als Ursache für eine Abkühlung in Grönland und eine Erwärmung in der Antarktis in Frage kommt, was in etwa auf einer Linie mit den Proxy-Aufzeichnungen liegt. Die meisten Beweislinien zeigen, dass ein großräumiges Abschmelzen von Eis ein Faktor ist, der die MOC unterbricht.

Vielleicht waren es Änderungen der Einstrahlung in hohen Breiten, die vor etwa 20.000 Jahren zu einer massive Eisschmelze führten, was die MOC verlangsamte, was wiederum die Antarktis erwärmte, was (durch unbekannte Prozesse) zu einer starken CO₂-Zunahme mit einer positiven Rückkopplung auf den Temperaturanstieg und damit dem Ende der letzten Eiszeit führte. Vielleicht nahm das CO₂ gleichzeitig mit der Temperatur in der Antarktis zu (siehe den kurzen Abschnitt zur Studie von Parrenin et al. (2013) in [Teil XI](#), was zu der Frage nach Ursache und Wirkung führt.

Um über Klima sinnvoll zu reden, müssen wir verstehen, warum:

- a) höhere Einstrahlung in hohen Breiten zuvor nicht zur gleichen Abfolge der Ereignisse geführt hat
- b) frühere Temperaturänderungen in der Antarktis nicht die gleiche Abfolge der Ereignisse ausgelöst haben
- c) die in der ORB-Simulation erzeugten Temperaturänderungen ausreichen, um genug Eis schmelzen zu lassen, um die MOC zu verändern (und welche Rückkopplungen dabei auftreten)

Und natürlich müssen wir verstehen, warum das CO₂ zum Ende der letzten Eiszeit so stark zugenommen hat.

Link:

<http://scienceofdoom.com/2014/01/16/ghosts-of-climates-past-twelve-gcm-v-ice-age-termination/>

Teil I und II:

<http://www.eike-klima-energie.eu/climategate-anzeige/das-raetsel-der-eiszeit-n-teil-i-und-ii/>

Teil III:

<http://www.eike-klima-energie.eu/climategate-anzeige/das-raetsel-der-eiszeit-n-teil-iii-hays-imbrie-shackleton/>

Teil IV:

<http://www.eike-klima-energie.eu/climategate-anzeige/das-raetsel-der-eiszeit-n-teil-iv-umlaufbahnen-jahreszeiten-und-mehr/>

Teil V:

<http://www.eike-klima-energie.eu/klima-anzeige/das-raetsel-der-eiszeiten-teil-v-aenderungen-der-ekliptik-und-der-praezession/>

Teil VI:

<http://www.eike-klima-energie.eu/klima-anzeige/das-raetsel-der-eiszeiten-teil-vi-hypothesen-im-ueberfluss/>

Teil VII:

<http://www.eike-klima-energie.eu/klima-anzeige/das-raetsel-der-eiszeiten-teil-7-global-circulation-models-i/>

Teil VIII:

<http://www.eike-klima-energie.eu/klima-anzeige/das-raetsel-der-eiszeiten-teil-8-global-circulation-models-ii/>

Teil IX:

<http://www.eike-klima-energie.eu/klima-anzeige/das-raetsel-der-eiszeiten-teil-9-global-circulation-models-iii/>

Teil X:

<http://www.eike-klima-energie.eu/klima-anzeige/das-raetsel-der-eiszeiten-teil-10-global-circulation-models-iv/>

Teil XI:

<http://www.eike-klima-energie.eu/klima-anzeige/das-raetsel-der-eiszeiten-teil-xi-das-ende-der-letzten-eiszeit/>