

Der Temperatur-CO₂-Klimazusammenhang: eine erkenntnistheoretische Neubewertung von Eisbohrkernen

geschrieben von Chris Frey | 1. Juni 2021

Die erkenntnistheoretische Schwäche der gegenwärtigen Simulationen rührt daher, dass sie sich auf keine unabhängigen Beweise für den Einfluss von Treibhausgasen auf das Klima über ausreichend lange Zeiträume stützen. Insbesondere kann die Gültigkeit der Modelle nicht nachgewiesen werden, solange zumindest die wichtigsten Merkmale der Klimaänderungen, nämlich die Glazial-Interglazial-Übergänge und die unterschiedliche Dauer der Interglaziale, unberücksichtigt bleiben. In ähnlicher Weise ist die konstante Zeitverzögerung von 7000 Jahren zwischen Temperatur- und CO₂-Abnahme nach der Deglazialisierung ein weiteres wichtiges Merkmal, das verstanden werden muss. In diesem Licht betrachtet, sollte die aktuelle Klimadebatte als die jüngste der großen Kontroversen betrachtet werden, die den Marsch der Geowissenschaften unterbrochen haben, obwohl sie sich von den vorangegangenen durch ihre unterschiedlichsten sozialen, ökologischen, ökonomischen und politischen Verästelungen deutlich unterscheidet.

1 Introduction

Das vielleicht wichtigste Merkmal, das die Geschichte der Wissenschaft beweist, ist, wie Gedanken, die für sehr lange Zeiträume einhellig akzeptiert wurden, schließlich entschieden verworfen wurden. Unter unzähligen Beispielen sind zwei der berühmtesten die zentrale Position der Erde im Universum und die Theorie der vier Elemente (Feuer, Luft, Wasser und Erde), die sich durch den Austausch ihrer vier Qualitäten (heiß, kalt, trocken und nass) gegenseitig umwandeln. Beide Theorien blieben trotz früh aufgezeigter Mängel 2 Jahrtausende lang unangefochten. Für den Geozentrismus widersprach z. B. die 24-Stunden-Drehung der entferntesten Fixsterne um den Pol gegen die feste Regel, dass die siderischen Umlaufzeiten von den 27,3 Tagen des Mondes bis zu den 29,4 Jahren des Saturn mit der Entfernung der Himmelskörper von der Erde deutlich zunehmen. In ähnlicher Weise wurde die Vier-Elemente-Theorie bereits von Theophrastus (4.-3. Jh. v. Chr.) kritisiert, der darauf hinwies, dass das Feuer „ohne Brennstoff nicht bestehen kann. Daher scheint es töricht, vom Feuer als einer ersten Substanz und einem ursprünglichen Element zu sprechen.“

So robust und überzeugend sie auch erscheinen mögen, Theorien sind selten immun gegen verschiedene Arten von Fehlern, die mehr oder weniger schnell auftauchen und als Keimzelle für entweder eine umfassende

Neuformulierung oder für eine vollständige Ablehnung dienen, wie zum Beispiel der Geozentrismus und die Vier-Elemente-Theorie. Unter der vernünftigen Prämisse, dass wir nicht schlauer sind als unsere Vorgänger, besteht ein faszinierendes Problem darin, herauszufinden, welche der gegenwärtig akzeptierten Theorien in der Zukunft in Vergessenheit geraten könnten, und Historiker untersuchen zu lassen, warum ihr Untergang nicht früher stattgefunden hat. Das Ziel besteht also darin, praktische oder theoretische Schwächen aufzuspüren und zu beurteilen, ob sie tatsächlich von Bedeutung sind oder nicht. Zu diesem Zweck sind erkenntnistheoretische Ansätze am wertvollsten, weil sie sich auf grundlegende Prinzipien konzentrieren, ohne sich in technische Details vertiefen zu müssen.

Eine These, der man folgen kann, ist, dass die anthropogenen Emissionen von CO₂ und anderen Treibhausgasen, wie z. B. Methan, das Klima der Erde stark erwärmen. Da die CO₂-Emissionen als der derzeit wichtigste Einflussfaktor auf das Klima gelten, denkt man über beispiellose Anstrengungen nach, wie man kohlenstofffreie Gesellschaften innerhalb weniger Jahrzehnte erreichen kann. In Anbetracht der großen sozialen, ökologischen, politischen und wirtschaftlichen Fragen, die ein solcher Übergang aufwirft, verdienen zwei Punkte besondere Aufmerksamkeit. Der erste betrifft die geochemischen Nachweise, die für die Treibhauswirkung von CO₂ (und auch von CH₄) über Zeiträume vorliegen, die lang genug sind, um große Klimazyklen zu umfassen. Der zweite befasst sich mit dem tatsächlichen heuristischen Wert von Klimasimulationen, der allgemein anerkannt zu sein scheint, ohne dass er wirklich tiefgreifend analysiert wurde. Beide Punkte sollen daher in der vorliegenden Studie aus erkenntnistheoretischer Sicht kritisch überprüft werden. Tatsächlich wird der verfolgte Ansatz durch die in beiden Punkten aufgezeigten gravierenden Schwächen gerechtfertigt, die insbesondere noch einmal verdeutlichen, warum Modelle, auf die man sich heute in vielen Bereichen der Wissenschaft und der öffentlichen Politik so ausgiebig verlässt, keinen wirklichen Beweiswert haben können.

...

3 Die Relation zwischen Temperatur und CO₂

3.1 Die Eisbohrkern-Analysen

Die bis in eine Tiefe von 3310 m gebohrten Eiskerne der russischen Vostok-Station haben die ersten umfassenden Klima-Aufzeichnungen über die letzten 423.000 Jahre geliefert (Petit et al., 1999). Einschließlich des aktuellen Zyklus' wurden fünf große Zyklen von Vergletscherung und Deglaziation festgestellt. Die vier ältesten Zyklen dauerten jeweils von 87.000 bis 123.000 Jahre, während derer sich die Temperaturen in der Antarktis um etwa 10°C veränderten und die atmosphärischen CO₂-Konzentrationen zwischen 180 und 300 ppmv (parts per million by volume; Abb. 1) schwankten, wobei die niedrigsten Werte die photosynthetische Aktivität zwar verlangsamten, aber nicht behinderten (Gerhart und Ward,

2010). Ein weiterer Datensatz, der bis 800.000 Jahre zurückreicht, wurde später am Standort Dome C des European Project for Ice Coring in Antarctica (EPICA), 560 km südlich von Vostok, gewonnen (Lüthi et al., 2008). Die beiden Analyseserien sind sich in ihrem Überlappungszeitraum sehr ähnlich. Zwischen 400.000 und 800.000 Jahre zeigt die Aufzeichnung von Dome C vier weitere Gletscherzyklen in einer Tiefe von 200 m. Möglicherweise aufgrund von Störungen und Umlagerungen des akkumulierten Eises zeigt das ältere Material jedoch Erwärmungs-/Abkühlungsepisoden in Form von breiteren Merkmalen. Obwohl diese zusätzlichen Zyklen für die Untersuchung von Übergängen zwischen glazialen und interglazialen Bedingungen wertvoll sind, werden sie hier nicht berücksichtigt, da ihre geringere Auflösung weitere Aussagen über die Temperatur-CO₂-Beziehung verhindert.

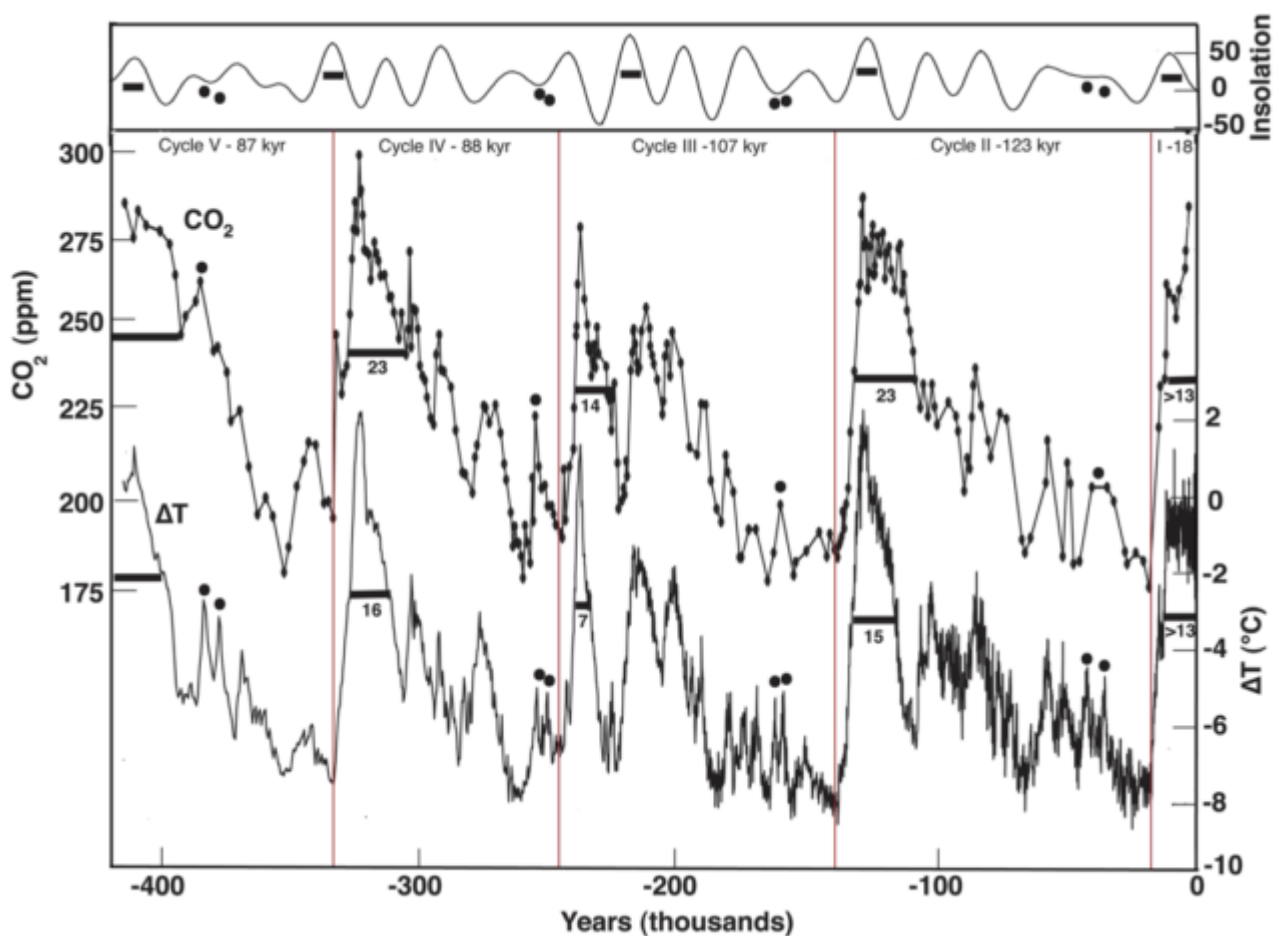


Abbildung 1: Temperaturschwankungen (ΔT) als Ursache für die Änderungen der atmosphärischen CO₂-Konzentrationen während der letzten 423.000 Jahre der Vostok-Aufzeichnung und ihre Kontrolle durch Milankovitch-Einstrahlungsschwankungen. Alle Daten aus Petit et al. (1999) sind in chronologischer Reihenfolge von links nach rechts aufgetragen, einschließlich der oben dargestellten Einstrahlungsschwankungen in Watt pro Quadratmeter (W/m^2), die für einen Referenzwert Mitte Juni bei 65°N angegeben sind. Die dünnen vertikalen Balken betonen die Steilheit der Temperatur- und CO₂-Anstiege zu Beginn der Zyklen, für die die jeweilige

Dauer angegeben ist (Zyklus V wegen seines fehlenden Beginns ausgeschlossen). Die systematisch schmalere Spitzen für die Temperaturen im Vergleich zu den CO₂-Konzentrationen sind besonders gut am Anfang der Zyklen zu erkennen (wo zusammenhängende Temperatur-, CO₂- und Einstrahlungsspitzen durch dicke horizontale Balken angezeigt werden) und durch die Temperatur- und CO₂-Spitzen (signalisiert durch ausgefüllte Punkte), die mit den reduzierten Einstrahlungsänderungen der charakteristischen wiederkehrenden Milankovitch-Konfigurationen verbunden sind (Punkte in den Einstrahlungsplots, die genau an den Positionen der Temperatur-Doubletten platziert sind). Quelle

[Von der Übersetzung dieser Passagen wird abgesehen, da das hier Beschriebene oft schon anderweitig beschrieben ist. Auch bzgl. der danach besprochenen geochemischen Einflüsse wird auf das Original verwiesen. A. d. Übers.]

...

4 Erkenntnistheoretische Analyse

4.1 Die atmosphärische CO₂-Konzentration: ein reiner Temperatureffekt?

Trotz der oben erwähnten Schlussfolgerung (iii) hat die bemerkenswerte Proportionalität zwischen den Amplituden der Anstiege der Temperaturen und der CO₂-Konzentrationen zu Beginn der Glazial-Interglazial-Übergänge dazu geführt festzustellen, welcher dieser beiden Parameter den anderen kontrollierte (Petit et al., 1999). Für die starken Anfangsanstiege ist die Bestimmung einer Zeitdifferenz zwischen den beiden Beobachtungsreihen problematisch, insbesondere wegen der Zeit, die für den Eisporen-Einschluss benötigt wird. Weitere Analysen und Interpretationen haben ergeben, dass die CO₂-Zunahmen weniger als 1 kyr hinter den anfänglichen Temperaturanstiegen zurückblieben (Fisher et al., 1999; Caillon et al., 2003; Vakulenko et al., 2004). Weitere Arbeiten weisen auf noch kürzere Zeitverzögerungen (Pedro et al., 2012) oder sogar auf eine praktische Synchronizität hin (Parrenin et al., 2013). Diese enge Kopplung steht in Übereinstimmung mit den schnellen Raten, mit denen sich das atmosphärische CO₂ an Änderungen der Ozeanoberflächentemperatur anpasst, wie sie in einer Studie über den Zeitraum 1980-2011 beobachtet wurden (Humlum et al., 2013).

[Es folgt eine sehr technisch gehaltene und umfangreiche Beschreibung des Verfahrens, hinsichtlich der ebenfalls auf das Original verwiesen wird. Wichtiger erscheinen die Implikationen all dessen, weshalb jetzt gleich zu diesen Abschnitten übergegangen wird. A. d. Übers.]

...

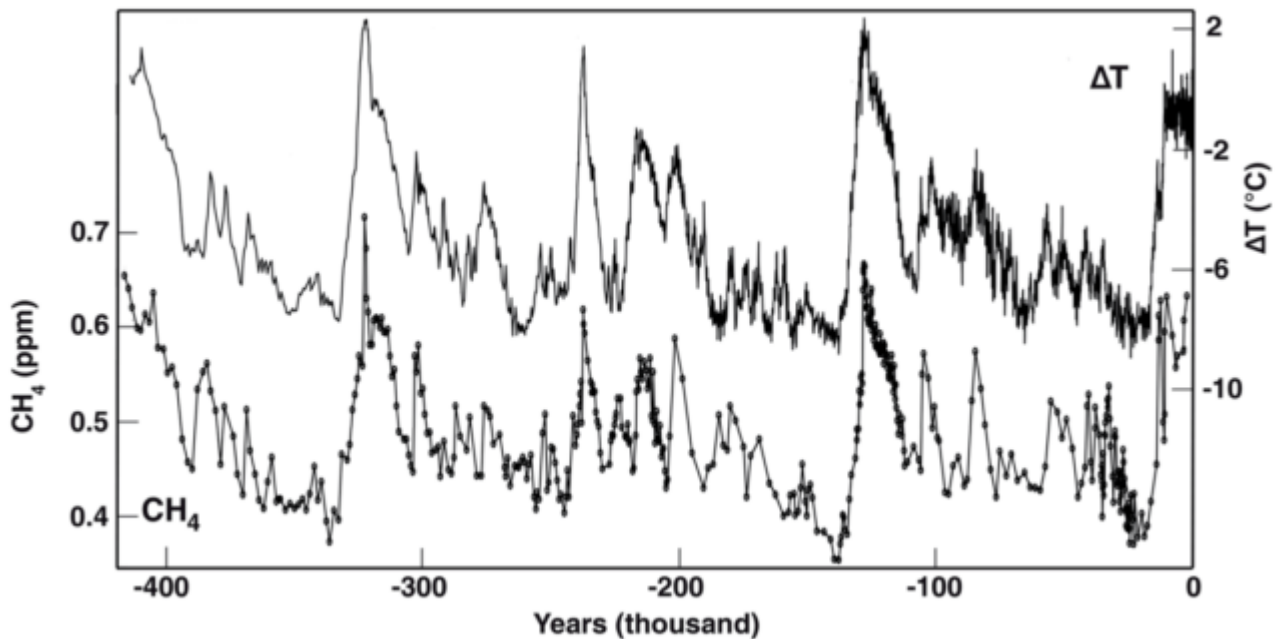


Abbildung 2: Die bemerkenswerte Korrelation zwischen den Schwankungen der Temperatur und der atmosphärischen Methankonzentrationen in der Vostok-Aufzeichnung. Die Daten aus Petit et al. (1999) sind in chronologischer Reihenfolge von links nach rechts aufgetragen. Quelle

5 Implikationen

5.1 Das CO₂-Phänomen

Korrelation impliziert in der Regel nicht zwangsläufig Kausalität. Ein Fehlen der Korrelation schließt dagegen jede Kausalität entschieden aus. Die von den Klimamodellen zugewiesene treibende Rolle des CO₂ mit den gegenteiligen Schlussfolgerungen aus den Eiskern Daten in Einklang zu bringen, scheint daher mit erheblichen Schwierigkeiten behaftet zu sein. Die Eiskernergebnisse verlagern also die Beweislast für einen CO₂-Einfluss auf die Temperatur auf die Befürworter des Rückkopplungsmechanismus und machen darüber hinaus jegliche Bestimmung der Klimasensitivität problematisch.

Aktuelle Klimamodelle sind in der Praxis nicht falsifizierbar im Sinne von Popper (1959), weil sie so komplex sind, so viele physikalische Parameter einbeziehen, auf so viele Daten für ihr Design und ihre Bewertung angewiesen sind, keine angemessenen Abschätzungen der Fehlerfortpflanzung haben und unter der Tatsache kranken, dass die Beobachtungen, die sie reproduzieren sollen, nicht nach Belieben verändert werden können, um ihre Reaktionen unter sehr unterschiedlichen Bedingungen zu überprüfen. Stattdessen wird behauptet, dass Modelle dank ihrer soliden physikalischen Grundlage zuverlässig sind, **was durch die vorliegende Analyse nicht gestützt wird**, während auch auf den subjektiven Begriff des Konsens' zurückgegriffen wird, um ihre Gültigkeit zu behaupten. Ob ein solcher Konsens vorliegt, muss hier nicht weiter diskutiert werden, da dieser Begriff epistemologisch

irrelevant ist. Wie bereits angedeutet, ist **die Geschichte der Wissenschaft nichts anderes als ein langer Spaziergang über den Friedhof, auf dem Ideen, die mit überwältigender Mehrheit akzeptiert wurden, nun in Frieden ruhen.**

[Hervorhebungen vom Übersetzer]

Für das vorliegende Thema wurde der Punkt im späten 19. Jahrhundert und dann wieder in der Mitte des 20. Jahrhunderts bemerkenswert gut durch den Konsens veranschaulicht, der nacheinander *für*, dann *gegen* und schließlich wieder *für* die astronomische Steuerung von Eiszeiten erreicht wurde. Wie Imbrie und Palmer Imbrie (1979) für die letztgenannte Periode feststellten, „wurden während der 1930er und 1940er Jahre die meisten europäischen Geologen von der Milankovitch-Theorie überzeugt“ und „die Mehrheit der Wissenschaftler favorisierte noch bis 1950 die astronomische Theorie. Aber in den frühen 1950er Jahren kam es zu einer dramatischen Kehrtwende, denn bis 1955 wurde die astronomische Theorie von den meisten Geologen abgelehnt.“ Die Argumente gegen die astronomische Theorie wurden besonders stark, als die neue Technik der ^{14}C -Datierung „ein Muster klimatischer Veränderungen offenbarte, das in fast jedem Punkt mit der astronomischen Theorie im Widerspruch stand.“ Kurz bevor Hays, Imbrie und Shackleton ihre bahnbrechende Studie veröffentlichten (Hays et al., 1976), war laut Imbrie und Palmer Imbrie „bis 1969 die Mehrheit der Wissenschaftler ausreichend beeindruckt von den Radiokohlenstoff-Beweisen gegen die Milankovitch-Theorie, um die Idee als ernsthaften Anwärter für die Auslösung von Eiszeiten zu eliminieren.“

Im Gegensatz zu Klimasimulationen ist die vorliegende Analyse offen für eine Falsifizierbarkeit, da ihr Trugschluss, falls vorhanden, eindeutig aufgezeigt werden könnte. In diesem Zusammenhang ist zu betonen, dass der hier verfolgte Ansatz alle für das Problem relevanten Faktoren mit entsprechender Gewichtung direkt integriert und völlig unabhängig ist von angenommenen physikalischen Mechanismen, vermuteten Wechselwirkungen zwischen Klimavariablen, Überlegungen zum CO_2 -Zyklus, statistischen Analysen ausgewählter, für das Problem als repräsentativ angenommener Datensätze und sonstigen Simulationsmerkmalen.

Eine Kardinalregel in der Wissenschaft ist es, eine Hypothese zu verwerfen, die den experimentellen Befunden, die sie erklären soll, eindeutig widerspricht, insbesondere wenn sie auch dem grundlegendsten Lehrsatz der Wissenschaft widerspricht, dem Prinzip des Nicht-Widerspruchs, das in den Worten von Aristoteles „das Sicherste von allem“ ist. Wenn die vorliegende Analyse nicht widerlegt werden kann, dann sollte man das Arrhen'sche Paradigma ablehnen und schlussfolgern, (i) dass Änderungen der Konzentration des atmosphärischen CO_2 bis 300 ppm allenfalls geringe Auswirkungen auf die Temperaturen während der letzten 423.000 Jahre hatten, (ii) dass sich die Konzentration des atmosphärischen CO_2 während dieser Periode einfach an die vorherrschenden Temperaturbedingungen an der Erdoberfläche angepasst hat, deren

Schwankungen hauptsächlich durch Einstrahlungsänderungen während der Milankovitch-Zyklen bestimmt wurden, und (iii) dass signifikante Beiträge von CO₂ und CH₄ zu Temperaturänderungen an der Erdoberfläche durch direkte, unabhängige Beweise nicht belegt sind.

Die Möglichkeit in Betracht zu ziehen, dass Temperaturanstiege entlang der Milankovitch-Zyklen durch steigende CO₂-Konzentrationen ausgelöst worden sein könnten, ist in der Tat überraschend, da dies gegen die grundlegende Thermodynamik verstoßen würde. Wie seit den Arbeiten von Planck bekannt, stellt Strahlung nicht nur Energie, sondern auch Entropie dar. Unabhängig davon, auf welche Art und Weise die Strahlungsentropie auf die Erdoberfläche und die Atmosphäre übertragen wird oder von ihnen verloren geht, ist es eine grundlegende Tatsache, dass Temperatur und Entropie die intensiven bzw. extensiven konjugierten Variablen der thermischen Energie sind. Unter allen Umständen ist also jede Temperatur- (oder allgemeiner: Enthalpie-) Änderung eines Systems notwendigerweise mit einer Entropieänderung verbunden (siehe Richey, 2001). Dies ist eine andere Art zu sagen, dass Treibhausgase das Klima nur über thermische Änderungen beeinflussen können. Als solche würden sich ihre Auswirkungen in jeder Temperaturaufzeichnung manifestieren, die in dieser Hinsicht als Thermogramme in thermischen Analysen betrachtet werden müssen.

Natürlich könnte man alternativ behaupten, dass andere Faktoren als CO₂-Temperatur-Wechselwirkungen an dem sehr komplexen Klimaproblem beteiligt sind; wenn dem so ist, wäre jedoch ein wichtiger Aspekt, dass Änderungen des atmosphärischen CO₂-Gehalts von zehn oder sogar hunderten Teilen pro Million sicherlich nicht direkt auf das Eisvolumen oder Kippunkte im Zusammenhang mit den Mustern der ozeanischen Zirkulation einwirken könnten, um nur ein wichtiges Merkmal zu nennen, sondern nur über thermische Änderungen wie oben beschrieben. Es bleibt also die Schlussfolgerung, dass **es weder in Klimamodellen noch in der Umweltpolitik sinnvoll ist, den Auswirkungen von CO₂ so viel Bedeutung beizumessen.**

[Hervorhebung vom Übersetzer]

Bei Eisbohrkernen ist ein erster Schlüsselfaktor, der zuverlässige Abschätzungen der Temperaturen in Bezug auf die CO₂- und CH₄-Konzentrationen gewährleistet, die Bestimmung der drei Parameter für dieselben Eisfragmente bekannten Alters. Ein zweiter Faktor ist die Tatsache, dass die in den Polarregionen beobachteten Temperaturschwankungen von bis zu 12°C während der Klimazyklen viel größer sind als die 2-3°C, die die gesamte Erde betreffen, was die viel höhere Auflösung der polaren Aufzeichnungen erklärt. Und ein dritter Faktor sind die großen Zeitskalen dieser Beobachtungen, die mehr als 1000-mal länger sind als die der Klimasimulationen und der verfügbaren Messungen von atmosphärischen Temperaturen und Gaskonzentrationen. Von besonderer Bedeutung ist auch, dass die hier betrachteten 423.000 Jahre lang genug sind, um vier komplette Gletscherzyklen zu umfassen, für die

kurzfristige Schwankungen vernachlässigt werden können, aber kurz genug, um nicht von anderen Faktoren beeinflusst zu werden, wie z.B. Änderungen der Kontinentalpositionen, die über sehr lange Zeitskalen eine wichtige Rolle spielen. Darüber hinaus ist das Fehlen von Korrelationen, die den CO₂-Antrieb unterstützen, immun gegen die unvermeidlichen Verzerrungen, die entstehen, wenn nicht zusammenhängende Datensätze für verschiedene Parameter verwendet werden, insbesondere wenn einige indirekt aus Proxy-Studien abgeleitet werden oder wenn Untersuchungen sich mit kurzen Zeiträumen befassen.

In der Atmosphäre wurde die maximale CO₂-Konzentration von 300 ppm, die in der Vostok-Aufzeichnung gefunden wurde, in den 1910er Jahren wieder erreicht. Die Hauptwirkung solch hoher Konzentrationen bestand lediglich darin, den zeitlichen Nachlauf des CO₂ hinter den Temperaturvorsprüngen erheblich zu vergrößern, ohne signifikante Auswirkungen auf das Klima der Vergangenheit. Daher ist es zweifelhaft, dass eine signifikante globale Erwärmung durch menschliche Emissionen während des größten Teils des 20. Jahrhunderts als Folge des bis in die 1980er Jahre beobachteten zusätzlichen CO₂-Anstiegs von 50 ppm verursacht worden sein könnte. In Anbetracht des Mangels an Beweisen für Rückkopplungsmechanismen, die besonders gut durch die CH₄-Aufzeichnung demonstriert werden, bleibt in der Tat zu bestimmen, ab welchem Niveau, wenn überhaupt, die CO₂-Konzentrationen beginnen würden, relevant zu werden und die schlimmen Folgen der aktuellen CO₂-Konzentrationen zu bestimmen. Das Prinzip der Parsimonie deutet also darauf hin, dass die gegenwärtige Erwärmung nur eine der wiederkehrenden Schwankungen ist, die in den letzten beiden Klimazyklen deutlich als Spitzen aufgezeichnet wurden, die in der Vostok-Aufzeichnung (Abb. 1) noch nicht gemittelt wurden und erstaunlicherweise in Diskussionen über kurzfristige Temperaturschwankungen übersehen zu werden scheinen. Wie schon oft angemerkt, wäre es in der Tat eine willkürliche Annahme, dass ein so chaotisches und hochgradig heterogenes System wie die Erde, das durch komplexe Sätze gekoppelter nichtlinearer Gleichungen beschrieben werden muss, sich über lange Zeiträume immer gleichmäßig entwickeln würde.

Die wahrscheinlich ausführlichste geochemische Diskussion der Gletscherzyklen und der Klimaauswirkungen von CO₂ wurde von Broecker (2018) veröffentlicht, der darauf hinwies, dass einige wichtige Merkmale des vergangenen Klimas nicht durch CO₂-Variationen erklärt werden können. Broecker stellte dennoch fest, dass „die geologische Aufzeichnung ein starkes Argument dafür liefert, dass CO₂ maßgeblich an vergangenen Klimaveränderungen beteiligt war“, und fügte hinzu, dass „wie die Aufzeichnung für die letzten 150.000 Jahre deutlich machen“, CO₂ „nicht allein gewirkt hat“, weil Sonneneinstrahlungszyklen, Ozeanzirkulation oder Reorganisation und latitudinale Temperaturgradienten ebenfalls dazu beigetragen haben. Die anderen von Broecker genannten Faktoren sind zwar weniger wichtig als die Sonneneinstrahlungszyklen, müssen aber bei detaillierteren Darstellungen des Klimawandels sicherlich berücksichtigt werden. Insgesamt beruht die

grundlegende Bedeutung der Antarktis-Aufzeichnungen jedoch auf der Tatsache, dass die Vergletscherungszyklen die auffälligsten Merkmale der Klimaveränderungen sind und dass die daraus resultierenden Meeresspiegelschwankungen notwendigerweise den gesamten Planeten betreffen. Von besonderem Interesse ist in diesem Zusammenhang die Synchronizität der Erwärmungs- und Abkühlungsepisoden, die über lange Zeitskalen zwischen Grönland und der Antarktis gefunden wurden (Pedro et al., 2011). Darüber hinaus deutet die bemerkenswerte Synchronität von Temperatur- und Methanvariationen auf das Fehlen größerer latitudinaler Zeitverzögerungen hin, da das Methanbudget weitgehend durch tropische Quellen und Senken (Loulergue et al., 2008) und nicht durch Wechselwirkungen mit dem Meerwasser (Reeburgh, 2007) gesteuert zu sein scheint.

5.2 Die Gefahr von Zirkelschlüssen

Petit (2013) behauptete, dass die verstärkende Rolle von CO₂ auf den Klimawandel zuerst durch die Wostok-Analysen nachgewiesen wurde und fügte hinzu, dass diese Ergebnisse dann „sehr schnell vom IPCC berücksichtigt wurden, der kürzlich zu dem Schluss kam, dass menschliche Aktivitäten für die aktuelle Klimaerwärmung verantwortlich sind.“ Die Bedeutung der Wostok-Ergebnisse stand also im Mittelpunkt der aktuellen Debatte, auch wenn inzwischen allgemein betont wird, dass die globale Erwärmung stattdessen durch ein quantitatives Verständnis der physikalischen Mechanismen nachgewiesen wird, durch die Temperaturen und CO₂-Konzentrationen in fortgeschrittenen Klimamodellen miteinander in Beziehung stehen.

Bezüglich ihrer Vostok-Analysen stellten Petit et al. (1999) fest, dass „Ergebnisse aus verschiedenen Klimasimulationen die Annahme nahelegen, dass Treibhausgase auf globaler Ebene signifikant (möglicherweise etwa die Hälfte, d. h. 2-3°C) zur global gemittelten glazial-interglazialen Temperaturänderung beigetragen haben.“ Dass diese Aussage durch die vorliegende Analyse eindeutig widerlegt wird, entkräftet wiederum die Klimasimulationen, aus denen sie abgeleitet wurde. Die CO₂-Rückkopplung, die die Eiskernergebnisse angeblich zeigen, scheint also ein Beispiel für eine **recht häufige Situation zu sein, in der eine vorgefasste Meinung über die Kausalität zu einer Fehlinterpretation der Daten geführt hat** – vielleicht auch deshalb, weil diese Ergebnisse nicht als Funktion der Zeit, sondern der Tiefe aufgetragen wurden, was die Illusion hervorrufen kann, dass CO₂-Spitzen systematisch den Temperaturspitzen vorausgehen. Diese Situation veranschaulicht die Gefahr, theoretische Konzepte auf ein sehr komplexes System zu übertragen, wenn die Beobachtungsunterstützung unvollständig ist oder wenn eine unabhängige, strenge Bewertung der Gültigkeit des Verfahrens fehlt. Mit anderen Worten: Die Interpretation der CO₂- und Temperaturaufzeichnungen von Eiskernen im Lichte von Klimamodellen stellt einen falschen methodischen Sprung dar. Ironischerweise würde jede Behauptung, dass Modelle die berichtete Klimaentwicklung seit dem späten 20. Jahrhundert genau reproduzieren, eher ihre falsche Natur

illustrieren und nicht ihre Gültigkeit beweisen, wenn die Temperaturanstiege dieser Periode nicht durch Erhöhungen der CO₂-Konzentrationen verursacht werden.

[Hervorhebung vom Übersetzer]

Hinzu kommt eine große erkenntnistheoretische Schwäche der Klimamodelle, denn die Zeitskalen von maximal 150 Jahren, die sie mit direkten oder indirekten Beobachtungen berücksichtigen, sind im Vergleich zu denen der kürzesten Schwankungen, welche die Klima-Aufzeichnungen zeigen, ungeheuer kurz (Abb. 1). Die Situation ist analog zu den Versuchen, die grundlegende Physik der Gezeiten zu verstehen, indem man sich auf eine einzelne Kräuslung an der Wasseroberfläche konzentriert und nicht auf ganze Ebbe- und Flut-Zyklen mit variablen Amplituden. Die Verlässlichkeit von Klimamodellen sollte also daran gemessen werden, ob sie in der Lage sind, zumindest die Hauptmerkmale der letzten Gletscherzyklen, beginnend mit den scharfen Glazial-Interglazial-Übergängen, wiederzugeben. Angesichts der fundamentalen Rolle, die den Treibhausgasen zugewiesen wird, kann kein bestimmtes Modell als gültig angesehen werden, solange die Breitenunterschiede zwischen Temperatur- und CO₂-Spitzen nicht quantitativ berücksichtigt werden.

Tatsächlich leiden die aktuellen Modelle an der zirkulären Natur der Argumentation hinter ihrem angenommenen Rückkopplungs-Mechanismus, wobei der vorhergesagte Einfluss von CO₂ letztlich einfach mit den postulierten Effekten in einer Situation übereinstimmt, in der die anthropogenen Anstiege der CO₂-Konzentrationen zufällig mit denen der Temperaturen einhergehen. In einer Art *reductio ad absurdum* würde sich eine ähnliche Situation ergeben, wenn man den beobachteten quantitativen Zusammenhang zwischen den jüngsten Anstiegen der atmosphärischen CO₂-Gehalte und der geographischen Verschiebung des magnetischen Nordpols (Abb. 3) als Kausalitätsbeziehung interpretieren würde – was natürlich angesichts einer völligen physikalischen Unplausibilität nicht ernsthaft in Betracht gezogen werden kann!

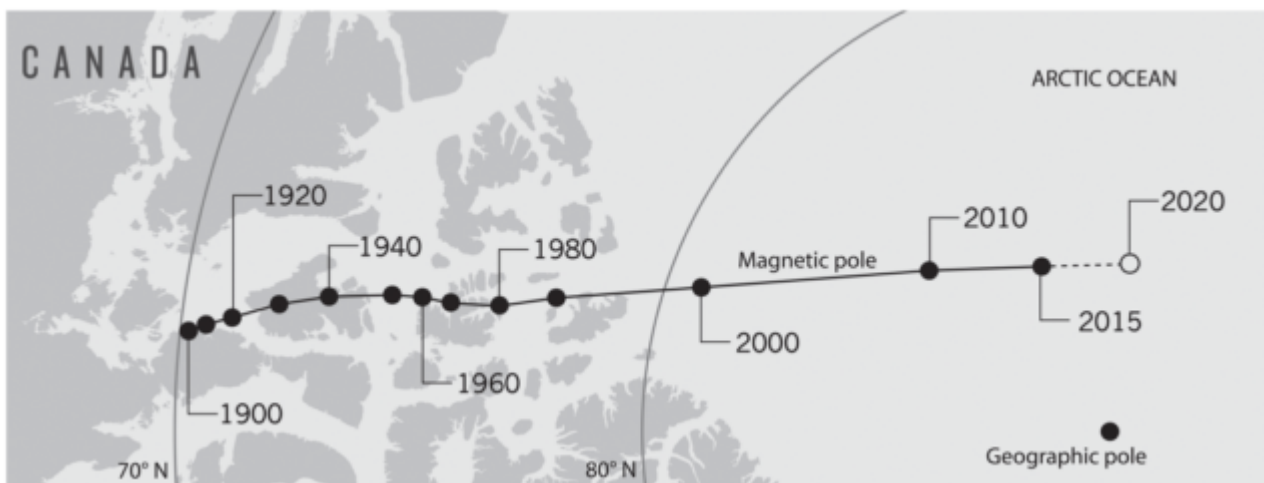


Abbildung 3: Die stark beschleunigte Verschiebung des magnetischen Nordpols (nach Witze, 2019). Ähnliche Strecken wurden von 1900 bis 1980 und von 2000 bis 2020 zurückgelegt, die quantitativ (aber natürlich zufällig) in beiden Zeiträumen mit einem ~40 ppm Anstieg der atmosphärischen CO₂-Konzentration korrelieren (Hawaii Observatory, 2019).

In einer bekannten Aussage veranschaulichte der lateinische Schriftsteller Macrobius (fl. frühes 5. Jh. v. Chr.) vor langer Zeit eine solche Zirkularität, als er erklärte, warum der Ort der Erde im Zentrum der Welt liegt. Er behauptete, in einer Art und Weise, die an komplexe Rückkopplungen erinnert, dass „jene Gründe wahrhaft unumstößlich sind, die sich gegenseitig bestätigen, wobei der eine den anderen begründet und jeder aus dem anderen hervorgeht, wobei er niemals die Unterstützung des anderen aufgibt.“ Dann schloss Macrobius, dass „die Natur mit solchen Bindungen die Erde festgehalten hat: alle Dinge tendieren zu ihr hin, weil sie sich als Mitte nicht bewegt; wiederum bewegt sie sich nicht, weil sie unten ist; schließlich muss sie unten sein, weil alle Dinge zu ihr hin tendieren.“

5.3 Geowissenschaften – ein Fallgruben-Erzeuger

Für einen Geowissenschaftler ist die laufende Klimadebatte eine Erinnerung an die lange Reihe von Kontroversen, für die die Geologie besonders anfällig war (siehe Hallam, 1989). Die enorme Größe, die sehr langen Zeitskalen, die Komplexität und die große Anzahl von Parametern, die für das Erdsystem als Ganzes berücksichtigt werden müssen, haben mehr als einmal eminente Wissenschaftler, die sich zu sehr ihrer eigenen Physik verschrieben haben, eindeutig in die Irre geführt. Die immer wieder zu hörende Behauptung, die Wissenschaft habe das Klimaproblem endgültig gelöst, erinnert den Beobachter besonders an zwei berühmte Debatten. In Bezug auf die Bewegung der Kontinente hatte der sehr einflussreiche Mathematiker und theoretische Geophysiker Jeffreys (1929) recht, als er behauptete, dass bei einer starren Erde „säkulare Drift der Kontinente relativ zum Rest der Kruste, wie sie von Wegener und anderen behauptet wurde, nicht in Frage kommt.“ Aber er lag trotzdem ziemlich falsch, weil er keine Konvektion in einem hochviskosen Mantel vorstellte, die zur gleichen Zeit von Holmes (1928) als ein brauchbarer Prozess vorgeschlagen worden war.

Relevant ist auch der Höhepunkt der langen Kontroverse über das Alter der Erde am Ende des 19. Jahrhunderts. Damals wurde ein Alter von weniger als 100 Millionen Jahren scheinbar mit äußerster Strenge, d. h. ohne jegliche Anpassungsparameter, auf vier völlig unabhängige Arten nachgewiesen, nämlich aus der Abkühlungsgeschichte der Erde aus einem ursprünglich geschmolzenen Zustand, aus dem Alter der Sonne, wie es durch den ersten Hauptsatz der Thermodynamik eingeschränkt wird, aus der Zeit, die der Weltozean benötigt, um seinen Salzgehalt zu erlangen, und aus dem Zeitpunkt, zu dem sich der Mond von der Erde trennte, wie er aus astronomischen Überlegungen berechnet wird (siehe Richet, 2007). Tait

(1885), ein bekannter Physiker und enger Freund Kelvins, veranschaulichte dann die Selbstsicherheit des Theoretikers, indem er behauptete: „Wir sagen: So viel zum Schlimmeren für die Geologie, wie sie gegenwärtig von ihren Hauptautoritäten verstanden wird, denn, wie Sie gleich sehen werden, machen es physikalische Überlegungen von verschiedenen unabhängigen Gesichtspunkten aus völlig unmöglich, dass mehr als zehn oder fünfzehn Millionen Jahre gewährt werden können.“

Vielleicht noch relevanter war der eindeutige Konsens, der in den 1890er Jahren erreicht wurde, als Geologen, die das Alter der Erde beurteilten, Wege fanden, die Anforderungen der Physiker zumindest teilweise zu erfüllen; indem sie ihre geschätzten Mächtigkeiten der stratigraphischen Säule und die durchschnittlichen Sedimentationsraten anpassten, kamen sie zu Altersangaben zwischen 26 und 100 Millionen Jahren. Die große Ironie der Situation bestand also darin, dass dieser Konsens, der spontan – d. h. ohne finanzielle Mittel, sozialen oder politischen Druck – erreicht wurde, um dem neu vorherrschenden physikalischen Paradigma zu entsprechen, nicht einmal zwei Jahrzehnte nach Tait's Äußerung in Stücke zerbrach, als radioaktive Datierungen stattdessen auf ein Alter von Milliarden Jahren hinzuweisen begannen (siehe Richey, 2007).

Im Gegensatz zum Kontext früherer Debatten ist es unwahrscheinlich, dass neue grundlegende Prinzipien entdeckt werden müssen, um das Verständnis des Klimas zu verbessern. Wie die im Laufe der Jahre aufgezeigten Grenzen aktueller Klimamodelle zeigen (z. B. Lindzen, 1997; Christy et al., 2018; Lewis und Curry, 2018; McKittrick und Christy, 2020; Mitchell et al., 2020), geht es vielmehr darum festzustellen, welche der getroffenen Grundannahmen und verwendeten Rechenverfahren entweder zu grob oder gar falsch sind und welche Faktoren und Wechselwirkungen in den Simulationen weggelassen oder nicht richtig berücksichtigt wurden.

Die Frage ist keineswegs neu, wurden doch bereits verschiedene Vorschläge dazu gemacht. Ohne hier die Stichhaltigkeit solcher Ansätze diskutieren zu müssen, soll es genügen darauf hinzuweisen, (i) dass auf die ständig nacheilende Wirkung der CO₂-Konzentrationen in Bezug auf die Änderungsrate des globalen Eises bereits hingewiesen wurde (z.B., Roe, 2006); (ii) dass der Strahlungsantrieb von CO₂ und CH₄ in klimatisch sensiblen Zonen und Breitengraden um ein Vielfaches kleiner ist als Änderungen der Sonneneinstrahlung (Soon, 2007); (iii) dass eine Verdopplung der gegenwärtigen Konzentrationen von CO₂ und CH₄ die Strahlungsantriebe um einige Prozent erhöhen würde, gemäß neueren Berechnungen, die für die fünf häufigsten Treibhausgase aus einem umfassenden Satz von über 333 000 Schwingungsbändern gemacht wurden (Van Wijngaarden und Happer, 2020); (iv) dass die üblicherweise angenommenen Treibhaus-Prozesse tatsächlich stark in Frage gestellt wurden (z. g., Chilingar et al., 2008; Allmendinger, 2017; Hertzberg et al., 2017; Nikolov und Zeller, 2017); (v) dass der Klimawandel aus dem fundamentalen thermodynamischen Blickwinkel der Entropieproduktion in der Atmosphäre wenig untersucht wurde (Delgado-Bonal, 2017); (vi) und dass das Gesamtbild auch in einer breiteren Perspektive umstritten ist

(z. B. Hertzberg und Schreuder, 2016; Fleming, 2018; Frank, 2019). In Anlehnung an z. B. Blaauw (2017) wäre es besonders interessant zu prüfen, ob einfachere Modelle, die frei von Treibhausgaseffekten sind, verlässlichere Ergebnisse für längere Zeitspannen als die derzeit betrachteten liefern würden.

5.4 Auf dem Weg in eine neue Eiszeit?

Wie bereits erwähnt, ist ein wichtiges Merkmal, das im Hinblick auf die dynamischen Reaktionen berücksichtigt werden muss, die konstante Zeitverzögerung von 7000 Jahren zwischen den Temperatur- und CO₂-Spitzen an den Interglazial-Glazial-Übergängen (Abb. 1). Sie ist viel länger als die Ausgleichszeiten für die CO₂-Aufnahme durch den Weltozean, aber ihr konstanter Wert deutet auf Prozesse von einer allgemeinen Reproduzierbarkeit hin, die nicht zu erwarten gewesen wäre.

Im Hinblick auf die Milankovitch-Zyklen ist ein weiteres Problem von besonderer Bedeutung, eine quantitative Erklärung für die beobachteten 1:2-Verhältnisse der Temperaturspitzenbreiten zwischen Zyklus III und den Zyklen II und IV zu finden. Der aktuelle Übergang I in Abb. 1 ermöglichte die Erfindung des Ackerbaus und führte zu den Anfängen und der Ausbreitung der Zivilisation. Mit 13.000 Jahren ist die Halbwertsbreite seines Temperaturpeaks jedoch bereits viel größer als die 7000 Jahre des Zyklus' III und nähert sich den 15.000 bis 16.000 Jahren der Zyklen II und IV, was ernsthaft die Frage nach der nächsten Eiszeit aufwirft.

Als man begann, die Gültigkeit der Milankovitch-Zyklen anzuerkennen, ging man allgemein davon aus, dass die Temperaturen seit den späten 1930er Jahren abgenommen hatten (siehe Imbrie und Palmer Imbrie, 1979). Dass die Abkühlung viel länger dauerte als die Erwärmung in den großen Klimazyklen, stellte Kukla (1970), ein Autor, der ebenfalls ein Verfechter der Abkühlungsthese war, in seinen Lößstudien fest. So schlussfolgerten Kukla und Matthews (1972) aus sich ausdehnenden Schneebänken um die Baffin-Insel, aus der die Schifffahrt behindernden Eisspitze um Island oder aus dem Rückzug wärmeliebender Tiere nach Süden, dass „das natürliche Ende unserer warmen Epoche zweifellos nahe ist, wenn man eine geologische Zeitskala betrachtet.“

Im aktuellen Kontext der globalen Erwärmung werden solche Ängste vor einer neuen Eiszeit im Nachhinein sehr leichtfertig geäußert. Nach einem Modell, das auf einer Beziehung zwischen borealer Sommereinstrahlung und CO₂-Konzentration basiert, würde die aktuelle Zwischeneiszeit wahrscheinlich noch 50 000 bis 100 000 Jahre andauern, abhängig von der Höhe der anthropogenen CO₂-Emissionen (Ganopolski et al., 2016). Selbst wenn ein CO₂-Antrieb angenommen wird, dann sollte die Zuverlässigkeit eines solchen Modells jedoch zunächst aus seiner Fähigkeit abgeleitet werden, die jeweiligen Dauer vergangener Eiszeiten quantitativ zu reproduzieren.

Solange eine solche Einschätzung fehlt, kann man stattdessen davon ausgehen, dass die hohe Sensitivität des Klimas gegenüber kleinen Merkmalen der Milankovitch-Zyklen (Abb. 1) es a priori unwahrscheinlich macht, dass die gegenwärtige Warmzeit wesentlich länger dauern sollte als die früheren. In dieser Hinsicht besteht der wichtige Unterschied zwischen heute und der Situation in den 1970er Jahren darin, dass die Abfolge von acht großen Gletscherzyklen während der letzten 800.000 Jahre so gut etabliert ist, dass die präzise Chronologie, die sich aus den Eiskernaufzeichnungen ergibt (Abb. 1), darauf hindeutet, dass ein Beginn der globalen Abkühlung in weniger als ein paar Jahrtausenden beobachtet werden könnte. Es ist zu erwarten, dass die Klimamodelle bis dahin den Grad an Zuverlässigkeit erreicht haben, der für genaue Vorhersagen erforderlich ist. Nichtsdestotrotz bleibt es dabei, dass die Bedrohung durch eine neue eintretende Eiszeit von außergewöhnlichem Ausmaß wäre, wie es bereits in den 1970er Jahren angedacht wurde, und die aktuellen Ängste vor einer globalen Erwärmung ziemlich unbedeutend aussehen lassen würde.

...

References

Allmendinger, T.: The refutation of the climate greenhouse theory and a proposal for a hopeful alternative, *Environ. Pollut. Climate Change*, 1, 19 pp., 2017.

Aristotle: *Metaphysica* [translation: Ross, W. D.: *Metaphysics*, in *Aristotle Complete Works*, edited by: Barnes, J., vol. II, Princeton University Press, Princeton, 1552–1728, 1984], 4th c. BCE.

Aristotle: *Topica* [translation: Pickard-Cambridge, W. A.: *Topics*, in: *Aristotle Complete Works*, edited by: Barnes, J., vol. I, Princeton University Press, Princeton, 166–277, 1984], 4th c. BCE.

Arrhenius, S. V.: On the influence of carbonic acid in the air upon the temperature of the ground, *Phil. Mag.*, 41, 237–276, 1896.

Blaauw, H. J.: Global warming: Sun and water, *Energy Environ.*, 28, 468–483, <https://doi.org/10.1177/0958305X17695276>, 2017.

Broecker, W. S.: Climate change: Are we on the brink of a pronounced global warming?, *Science*, 401, 460–463, 1975.

Broecker, W. S.: CO₂: Earth's climate driver, *Geochem. Perspect.*, 7, 117–196, 2018.

Buffon, G.-L.: *Leclerc, count of Histoire naturelle, Premier discours*, English translation of the excerpt, p. 352, 1749.

Buizert, C., Cuffey, K. M., Severinghaus, J. P., Baggenstos, D., Fudge, T. J., Steig, E. J., Markle, B. R., Winstrup, M., Rhodes, R. H., Brook,

E. J., Sowers, T. A., Clow, G. D., Cheng, H., Edwards, R. L., Sigl, M., McConnell, J. R., and Taylor, K. C.: The WAIS Divide deep ice core WD2014 chronology – Part 1: Methane synchronization (68–31 ka BP) and the gas age–ice age difference, *Clim. Past*, 11, 153–173, <https://doi.org/10.5194/cp-11-153-2015>, 2015.

Caillon, N., Severinghaus, J. P., Jouzel, J., Barnola, J.-M., Kang, J., and Lipenkov, V. Y.: 2003. Timing of atmospheric CO₂ and Antarctic temperature changes across termination III, *Science*, 299, 1728–1731, 2003.

Chilingar, G. V., Sorokhtin, O. G., Khilyuk, L., and Gorfunkel, M. V.: Greenhouse gases and greenhouse effects, *Environ. Geol.*, 58, 1207–1213, <https://doi.org/10.1007/s00254-008-1615-3>, 2008.

Christy, J. R., Spencer, R. W., Braswell, W. D., and Junod, R.: Examination of space-based bulk atmospheric temperatures used in climate research, *Int. J. Rem. Sens.*, 39, 3580–3607, 2018.

Crucifix, M., Loutre, M. F., and Berger, A.: The climate response to the astronomical forcing, *Space Sci. Rev.*, 125, 213–226, 2006.

Delgado-Bonal, A.: Entropy of radiation: the unseen side of light, *Sci Rep.*, 7, 1642, <https://doi.org/10.1038/s41598-017-01622-6>, 2017.

Democritus: Testimony D.K. 68 B117/184a [translation: Taylor, C. C. W.: *The Atomists Leucippus and Democritus: Fragments, A Text and Translation*, Univ. Toronto Press, Toronto, 1999], 5th–4th c. BCE.

Edvardsson, S., Karlsson, K. G., and Engholm, M.: Accurate spin axes and solar system dynamics: Climatic variations for the Earth and Mars, *Astron. Astroph.*, A384, 689–701, 2002.

EPICA: community members: Eight glacial cycles from an Antarctic ice core, *Nature*, 429, 623–628, 2004.

Fisher, H., Wahlen, M., Smith, J., Mastroianni, D., and Deck, B.: Ice core records of atmospheric CO₂ around the last three glacial terminations, *Science*, 283, 1712–1714, 1999.

Fleming, R. J.: An updated review about carbon dioxide and climate change, *Environ. Earth Sci.*, 77, 13 pp., 2018.

Fourier, J.: Mémoire sur les températures du globe terrestre et des espaces planétaires, *Mém. Acad. Sci.*, 7, 569–604, 1827.

Frank, P.: Propagation of error and the reliability of global air temperature projections, *Front. Earth Sci.*, 7, 223, <https://doi.org/10.3389/feart.2019.0223>, 2019.

Ganopolski, A., Winkelmann, R., and Schellnhuber, H. J.: Critical

insolation-CO₂ relation for diagnosing past and future glaciation, *Nature*, 529, 200–203, 2016.

Gerhart, L. M. and Ward, J. K.: Plant responses to low [CO₂] of the past, *New Phytol.*, 188, 624–695, 2010.

Gest, L., Parrenin, F., Chowdhry Beeman, J., Raynaud, D., Fudge, T. J., Buizert, C., and Brook, E. J.: Leads and lags between Antarctic temperature and carbon dioxide during the last deglaciation, *Clim. Past Discuss.* [preprint], <https://doi.org/10.5194/cp-2017-71>, 2017.

Hallam, A.: *Great Geological Controversies*, Oxford Univ. Press, Oxford, 1989.

Hawaii Observatory: Atmospheric CO₂ at Mauna Loa Observatory, available at: <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/odop/mlo/> (last access: January 2021), 2020.

Hays, J. D., Imbrie, I., and Shackelton, N. J.: Variations in Earth's orbit – pacemaker of ice ages, *Science*, 194, 1121–1132, 1976.

Hertzberg, M. and Schreuder, H.: Role of atmospheric carbon dioxide in climate changes, *Energ. Environ.*, 27, 785–797, <https://doi.org/10.1177/0958305X16674637>, 2016.

Hertzberg, M., Siddons, A., and Schreuder, H.: Role of greenhouse gases in climate changes, *Energ. Environ.*, 28, 530–539, <https://doi.org/10.1177/0958305X17706177>, 2017.

Holmes, A.: Radioactivity and Earth movements, *Trans. Geol. Soc. Glasgow*, 18, 559–606, 1931 [N. B. address delivered in 1928].

Humlum, O., Stordahl, K., and Solheim, J.-E.: The phase relation between atmospheric carbon dioxide and global temperature, *Glob. Planet. Change*, 100, 51–69, 2013.

Imbrie, J. and Palmer Imbrie, K.: *Ice Ages. Solving the Mystery*, p. 117, 119, 121 and 141, McMillan, London, 1979.

IPCC: Working group I: Contribution to the IPCC Fifth Assessment Report (AR5), *Climate change, The Physical Science Basis*, IPCC, Geneva, 2013.

Jeffreys, H.: *The Earth, Its Origin, History and Physical Constitution*, Cambridge, Cambridge Univ. Press, 2nd Edn., p. 305, 1929.

Jouzel, J., Alley, R. B., Cuffey, K. M., Dansgaard, W., Grootes, P., Hoffmann, G., Johnsen, S. J., Koster, R., Peel, D., Shuman, C. A., Stievenard, M., Stuiver, M., and White, J.: Validity of the temperature reconstruction from water isotopes in ice cores, *J. Geophys. Res.*, 102, 26471–26487, 1997.

Kukla, G. J.: Correlation between loesses and deep-sea sediments, *Geol. Fören. Stockholm Förh.*, 92, 148–180, 1970.

Kukla, G. J. and Matthews, R. K.: When will the present interglacial end?, *Science*, 178, 190–191, 1972.

Lane, C. S., Chorn, B. T., and Johnson, T. C.: Ash from Toba supereruption in Lake Malawi shows no volcanic winter in East Africa at 75 ka, *P. Natl. Acad. Sci. USA*, 110, 8025–8029, 2013.

Lee, C.-T., Jiang, H., Dasgupta, R., and Torres, M.: A framework for understanding whole-earth carbon cycling, in: *Deep Carbon, Past to Present*, edited by: Orcutt, B. N., Daniel, I., and Dasgupta, R., Cambridge Univ. Press, Cambridge, 313–357, 2019.

Lemieux-Dudon, B., Blayo, E., Petit, J.-R., Waelbroeck, C., Svensson, A., Ritz, C., Barnola, J.-M., Narcisi, B. M., and Parrenin, F.: Consistent dating for Antarctic and Greenland ice cores, *Quaternary Sci. Rev.*, 29, 8–20, 2010.

Lewis, N. and Curry, J.: The impact of recent forcing and ocean uptake data on estimates of climate sensitivity, *J. Clim.*, 31, 6051–6071, 2018.

Lindzen, R.: Can increasing carbon dioxide cause climate change?, *P. Natl. Acad. Sci. USA*, 94, 8335–8342, 1997.

Lorius, C., Jouzel, J., Raynaud, D., Hansen, J., and Le Treut, H.: The ice-core record: climate sensitivity and future greenhouse warming, *Nature*, 347, 139–145, 1990.

Loulergue, L., Schilt, A., Spahni, R., Masson-Delmotte, V., Blunier, T., Lemieux, B., Barnola, J.-M., Raynaud, D., Stocke, T. F., and Chappellaz, J.: Orbital and millennial-scale features of atmospheric CH₄ over the past 800,000 years, *Nature*, 453, 383–386, 2008.

Lüthi, D., Le Floch, M., Bereiter, B., Blunier, T., Barnola, J.-M., Siegenthaler, U., Raynaud, D., Jouzel, J., Fische, H., Kawamura, K., and Stocker, T. F.: High-resolution carbon dioxide concentration record 650,000–800,000 years before present, *Nature*, 453, 379–382, 2008.

Macrobius: *Commentarii in somnium Scipionis*, book 9, Ch. XII [translation: Stahl, W. H.: *Commentary on the Dream of Scipio*, Columbia Univ. Press, New York, 1966], early 5th c. CE.

McKittrick, R. and Christy, J.: Pervasive warming bias in CIMIP6 tropospheric layers, *Earth Space Sci.*, 7, e2020EA001281, <https://doi.org/10.1029/2020EA001281>, 2020.

Michard, G.: Can we explain atmospheric carbon dioxide oscillations during the past 400,000 years?, *Geosciences*, 340, 483–494, 2008.

Milankovitch, M.: Über ein Problem der Wärmeleitung und dessen Anwendung auf die Theorie des solaren Klimas, *Z. Mathem. Phys.*, 62, 63–77, 1913.

Mitchell, D. M., Lo, Y. T. E., Servius, W. J. M., Haimberger, L., and Polvani, L.: The vertical profile of recent tropical temperature trends: Persistent model biases in the context of internal variability, *Environm. Res. Lett.*, 15, 1040b4, <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab9af7>, 2020.

Mudelsee, M.: The phase relations among atmospheric CO₂ content, temperature and global ice volume over the past 420 ka, *Quaternary Sci. Rev.*, 20, 583–589, 2001.

Nikolov, N. and Zeller, K.: New insights on the physical nature of the atmospheric greenhouse effect deduced from an empirical planetary temperature model, *Environ. Pollut. Clim. Change*, 1, 1000112, 2017.

Parrenin, F., Masson-Delmotte, V., Köhler, P., Raynaud, D., Paillard, D., Schwander, J., Barbante, C., Landais, A., Wegner, A., and Jouzel, J.: Synchronous change of atmospheric CO₂ and Antarctic temperature during the last deglacial warming, *Science*, 339, 1060–1063, 2013.

Pedro, J. B., van Ommen, T. D., Rasmussen, S. O., Morgan, V. I., Chappellaz, J., Moy, A. D., Masson-Delmotte, V., and Delmotte, M.: The last deglaciation: timing the bipolar seesaw, *Clim. Past*, 7, 671–683, <https://doi.org/10.5194/cp-7-671-2011>, 2011.

Pedro, J. B., Rasmussen, S. O., and van Ommen, T. D.: Tightened constraints on the time-lag between Antarctic temperature and CO₂ during the last deglaciation, *Clim. Past*, 8, 1213–1221, <https://doi.org/10.5194/cp-8-1213-2012>, 2012.

Petit, J. R.: Interview by F. Cristofol, Jean-Robert Petit, une vie antarctique, available at: <https://www.echosciences-grenoble.fr/articles/jean-robert-petit-une-vie-antarctique> (last access: January 2021), 2013.

Petit, J.-R., Jouzel, J., Raynaud, D., Barkov, N. I., Barnola, J.-M., Basile, I., Bender, M., Chappellaz, J., Davisk, M., Delaygue, G., Delmotte, M., Kotlyakov, V. M., Legrand, M., Lipenkov, V. Y., Lorius, C., Pépin, L., Ritz, C., Saltzmank, E., and Stievenard, M.: Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica, *Nature*, 399, 429–436, 1999.

Popper, K. R.: *The Logic of Scientific Discovery*, Hutchinson and Co, London, 1959.

Raynaud, D., Jouzel, J., Barnola, J. M., Chappelaz, J., Delmas, R. J., and Lorius, C.: The ice record of greenhouse gases, *Science*, 259, 926–934, 1993.

Reeburgh, W. S.: Oceanic methane biogeochemistry, *Chem. Rev.*, 107, 486–513, 2007.

Richet, P.: *The Physical Basis of Thermodynamics*, chap. 1, Plenum Publishing, New York, 2001.

Richet, P.: *A Natural History of Time*, transl. from the French by J. Venerella, The Univ. Chicago Press, Chicago, 2007.

Roe, G.: In defense of Milankovitch, *Geophys. Res. Lett.*, 33, L24703, <https://doi.org/10.1029/2006GL027817>, 2006.

Soon, W.: Implications of the secondary role of carbon dioxide and methane forcing in climate change: past, present, and future, *Phys. Geogr.*, 28, 97–125, 2007.

Tait, P. G.: *Lectures on Some Recent Advances in Physical Science*, with a Special Lecture on Force, Macmillan, London, 169–170, 1885.

Theophrastus, *De Igne*: [translation: Coutant, V.: *Theophrastus De Igne. A Post-Aristotelian View of the Nature of Fire*, Royal Vangorcum Ltd, Assen, 1971], 4th–3rd c. BCE.

Tyndall, J.: On the absorption and radiation of heat by gases and vapours, and on the physical connection of radiation, absorption and conduction, *Phil. Mag.*, 22, 169–194 and 273–285, 1861.

Vakulenko, N. V., Kotlyakov, M., Monin, A. S., and Sonechkin, D. M.: Evidence for the leading role of temperature variations relative to greenhouse gas concentration variations in the Vostok ice core record, *Doklady Earth Sci.*, 396, 686–690, 2004.

Van Wijngaarden, W. A. and Happer, W.: Dependence of Earth's thermal radiation on five most abundant greenhouse gases, arXiv [preprint], arXiv:2006.03098v1, 4 June 2020.

Witze, A.: Earth's magnetic field is acting up, *Nature*, 565, 143–144, 2019

Link:

<https://wattsupwiththat.com/2021/05/27/the-temperature-co2-climate-connection-an-epistemological-reappraisal-of-ice-core-messages/>

Übersetzt von Chris Frey EIKE