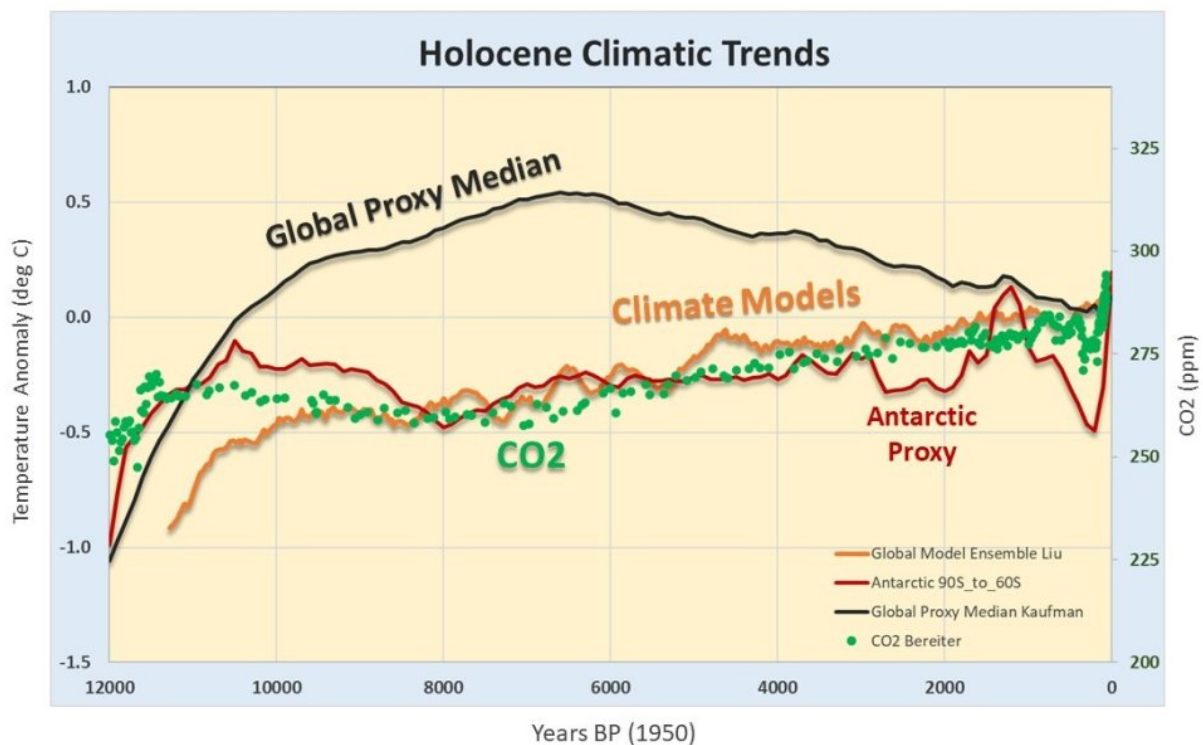


Das CO₂-Dilemma des Holozäns

geschrieben von Chris Frey | 31. Mai 2023

Renee Hannon

In diesem Beitrag wird die Beziehung zwischen dem globalen CO₂ und den regionalen Temperaturtrends während der Zwischeneiszeit des Holozäns untersucht. Eisbohrkern-Aufzeichnungen zeigen, dass CO₂ stark mit der lokalen Temperatur in der Antarktis gekoppelt ist und der Temperatur in den letzten 800.000 Jahren leicht hinterherhinkt (Luthi, 2008). Während der Schwerpunkt auf CO₂- und Temperaturverschiebungen lag, konzentriert sich diese Studie auf holozäne Jahrtausend-Trends in verschiedenen Regionen, begrenzt durch den Breitengrad.



Die widersprüchliche Antarktis

Das Holozän kann sich glücklich schätzen, dass es Hunderte von Proxydaten gibt, die von Marcott (2013) und kürzlich von Kaufman (2020) analysiert worden sind, um regionale und globale Temperaturtrends zu ermitteln. Das Interglazial des Holozäns liegt ungefähr in den letzten 11.000 Jahren. Im Allgemeinen zeigen globale Temperaturtrends aus Proxydaten ein holozänes Klimaoptimum (HCO) vor etwa 6000 bis 8000 Jahren und eine anschließende Abkühlung, die Neoglazialzeit, die in der Kleinen Eiszeit (LIA) gipfelte. Die globale Durchschnittstemperatur setzt sich aus regionalen Trends zusammen, die während des Holozäns tendenziell konkav nach unten verlaufen, wie in Abbildung 1a dargestellt.

Die Ausnahme ist die Antarktis, die in rot dargestellt ist und eine konkave Form nach oben aufweist. Die Antarktis erreichte vor 9000 bis 11000 Jahren ein frühes holozänes klimatisches Optimum. Während die globalen und die meisten regionalen Temperaturen stiegen, kühlte die Antarktis vor etwa 8000 Jahren auf ein Minimum ab. Während die globale und andere Regionen eine fortschreitende Abkühlung während des Neoglazials zeigten, war der Verlauf in der Antarktis flach und unregelmäßig. Dieses konträre Temperaturverhalten der Antarktis während des Holozäns wurde auch von Andy May [hier](#) festgestellt [in deutscher Übersetzung [hier](#)].

Holocene Temperature and CO2 Trends

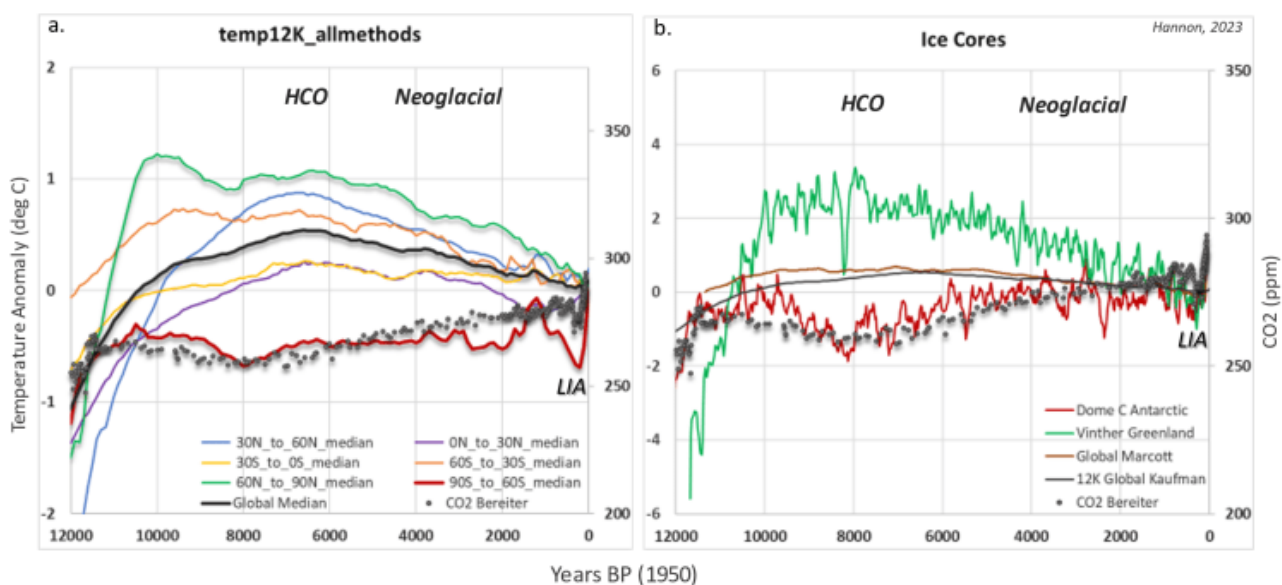


Abbildung 1: a) Regionale Temperaturanomalien (definiert nach Breitengrad) aus Proxydaten über das Holozän nach Kaufman, 2020a. Die rote Linie ist die Antarktis. Die schwarze durchgezogene Linie ist der globale Median. b) Eisbohrkern-Proxydaten von Vinther Grönland Temperaturanomalien in grün und Dome C Antarktis in rot. Die globalen Temperaturmittelwerte von Kaufman und Marcott sind enthalten. CO₂, dargestellt als dunkelgraue Punkte von Bereiter, ist in beiden Diagrammen enthalten. Die linke Achse ist die Temperaturanomalie (Grad Celsius) und die rechte Achse ist CO₂ (ppm).

Grönländische und antarktische Eiskerntemperaturanomalien, die aus Deuterium- und/oder Sauerstoffisotopen abgeleitet wurden, sowie globale Proxy-Temperaturmittelwerte sind in Abbildung 1b dargestellt. Eiskerne haben eine hohe Auflösung über lange Zeiträume, was sie zu einem wichtigen Proxy-Datensatz macht. Diese Daten zeigen ähnliche Trends wie die regionale Zusammenstellung. Allerdings sind die Temperaturspannen an einzelnen Proxy-Standorten tendenziell größer. Die Glättung von Proxydaten für das Paläoklima erfolgt durch die Mittelwertbildung

mehrerer Datentypen, wodurch lokale Temperaturschwankungen beseitigt werden (Kaufman, 2023).

Es ist nicht überraschend, dass sich die Temperaturtrends in der Antarktis aufgrund ihrer einzigartigen Umgebung anders verhalten. Die Antarktis ist ein vom Südlichen Ozean umgebener Kontinent mit einer mittleren Jahrestemperatur im Inneren zwischen -50 und -60 °C. Der größte Teil der Antarktis ist von einem permanenten Eisschild mit einer durchschnittlichen Dicke von 2 km bedeckt. Die spärlichen Proxydaten aus der Antarktis stammen überwiegend aus Eisbohrkernen und einigen wenigen Meeressedimenten. Diese Daten umfassen Temperaturtrends in der Region des 90. bis 60. Breitengrades, die weniger als 10 % der Erdoberfläche ausmacht.

CO₂ ist einzigartig synchron mit den antarktischen Temperaturen

In Eisblasen eingeschlossenes CO₂-Gas zeigt synchrone Trends mit lokalen antarktischen Temperaturanomalien während der Eiszeiten und Zwischeneiszeiten der letzten 800.000 Jahre. Der CO₂-Gehalt reicht von Tiefstwerten von 180 ppm während der Eiszeiten bis zu Höchstwerten von fast 300 ppm während der Zwischeneiszeiten. Abbildung 2a zeigt die lineare Regression von CO₂ und Temperatur aus dem EPICA Dome C Eiskern über die letzten 60.000 Jahre, die das holozäne Interglazial und das letzte glaziale Maximum umfasst. Die quadratische Regression (R^2) von 0,9 ist sehr beeindruckend. Ein interessantes Kuriosum ist die holozäne Zwischeneiszeit, in der die Steigung tendenziell abflacht und R^2 deutlich auf 0,3 sinkt.

Trotz des niedrigeren Korrelationsfaktors für das Interglazial des Holozäns zeigt Abbildung 1a oben, dass CO₂ wie die antarktischen Temperaturtrends einen konkaven Aufwärtstrend aufweist. CO₂ erreicht im frühen Holozän einen Höchststand von 275 ppm vor etwa 11.000 Jahren nach der Deglazialisierung. Danach sinkt CO₂ langsam um 10-15 ppm bis zu einem holozänen Minimum von 260 ppm vor etwa 8000 Jahren. Danach steigt das CO₂ während der neoglazialen Abkühlung allmählich bis auf 290 ppm. Zu beachten ist, dass diese CO₂-Werte aufgrund von Gaseinlagerungsprozessen im Eis gedämpft oder geglättet sind und nicht die instrumentellen Werte widerspiegeln (Joos, 2008).

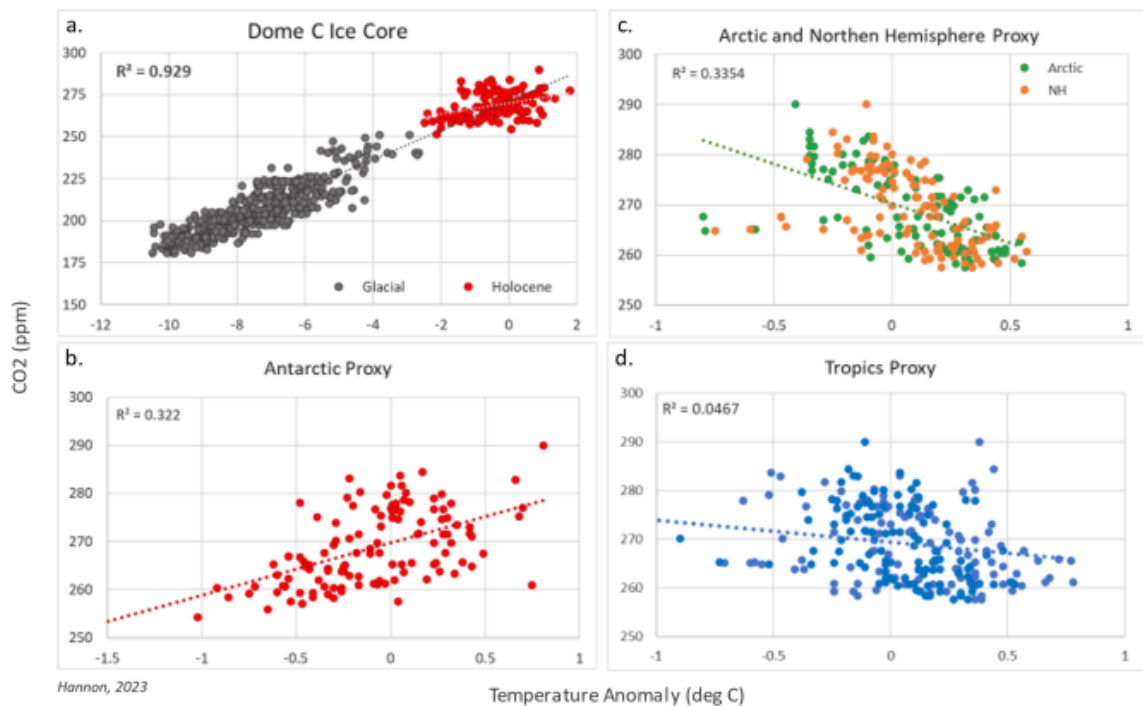


Abbildung 2a) Eiskern EPICA Dome C Korrelation der Temperaturanomalien mit CO₂ über die letzten 60.000 Jahre in grau. Die holozäne Zwischeneiszeit ist rot hervorgehoben. Abbildung 2b) Korrelation von Temperaturanomalien aus antarktischen Proxydaten 90oS-60oS mit CO₂. c) Korrelation von Temperaturanomalien aus arktischen 60oN-90oN und NH 30oN-60oN Proxydaten mit CO₂. d) Korrelation von Temperaturanomalien aus tropischen Proxydaten 30oS-30oN mit CO₂. CO₂-Daten von Bereiter, 2014. Hochauflösende Proxydaten aus Kaufman, 2020b.

Die Abbildungen 2b-d zeigen Korrelationsdiagramme von holozänen CO₂- und Temperaturanomalien aus hochauflösenden regionalen Proxy-Temperaturen. Sie unterscheiden sich deutlich von der 60.000-jährigen CO₂-Beziehung in der Antarktis in Abbildung 2a. Die Arktis und die Regionen der nördlichen Hemisphäre (2c) zeigen eine umgekehrte Beziehung zum CO₂, insbesondere während der Neoglazialzeit. Die tropische Region (2d) weist eine große Streuung auf, ohne dass ein statistisch gültiger Trend erkennbar wäre. Die südliche Hemisphäre (nicht gezeigt) weist ebenfalls eine geringe Korrelation mit CO₂ auf. In keiner anderen Multiproxy-Region oder in keinem anderen Breitengrad sind die Temperaturtrends während des Holozäns so stark positiv mit CO₂ korreliert wie in der Antarktis.

Die Autoren haben festgestellt, dass der CO₂-Trend im Vergleich zu den globalen und nordhemisphärischen Temperaturtrends anders verläuft. Vinos, 2022, kommt zu dem Schluss, dass CO₂ während des größten Teils des Holozäns entgegengesetzt zu den globalen Temperaturtrends verläuft. Dieses asynchrone Verhalten des CO₂ und/oder die fehlende Korrelation mit der Temperatur scheint für die meisten Regionen, d. h. für etwa 90 % der Erdoberfläche, zu gelten.

Klimamodelle werden von CO₂-Antrieb dominiert

Die Klimamodelle stimmen nicht mit den globalen Proxy-Temperaturen des Holozäns überein, was als das Holozän-Temperaturrätsel bekannt ist (Liu, 2014). Die Modelle zeigen grundsätzlich einen allmählichen Anstieg der Temperaturen während des gesamten Holozäns, wie in Abbildung 3a dargestellt. Die Proxy-Temperaturdaten zeigen jedoch ein holozänes Klimaoptimum von 0,5 Grad Celsius vor etwa 6000-8000 Jahren, das die Klimamodelle einfach nicht wiedergeben können.

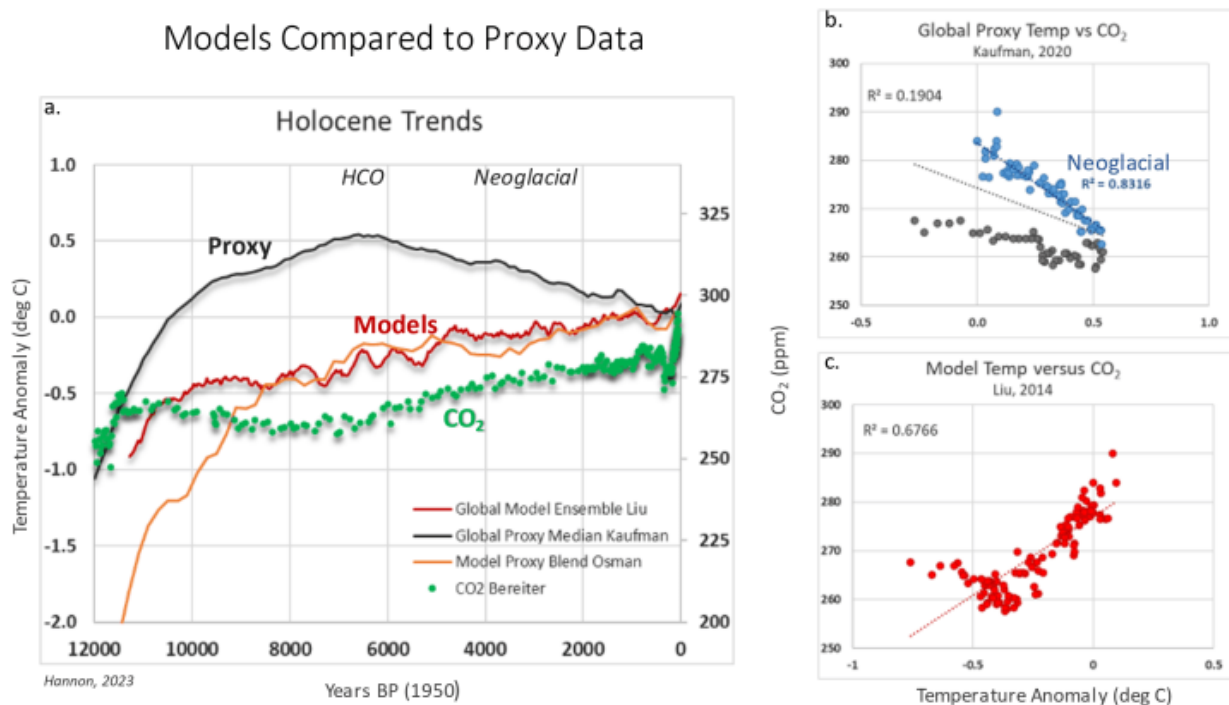


Abbildung 3a) Globale Proxy-Median-Temperaturanomalien von Kaufman im Vergleich zum modellierten jährlichen Ensemble-Mittelwert (3 Modelle) von Liu und einem Modell, das Proxy-Daten von Osman einbezieht. CO₂ ist als grüne Punkte von Bereiter dargestellt. b) CO₂ korreliert mit dem globalen Proxy-Median von Kaufman, und c) CO₂ korreliert mit dem modellierten jährlichen Ensemble-Mittelwert von Liu.

Die globalen Proxy-Temperaturtrends des Holozäns zeigen eine umgekehrte Korrelation mit CO₂, wie in Abbildung 3b dargestellt. Es gibt zwei verschiedene inverse Trends, die durch den HCO getrennt sind. Während des Neoglazials zeigen die Proxy-Temperaturen und CO₂ eine starke negative Korrelation mit einem R² von 0,8. Grundsätzlich gilt, dass mit steigendem CO₂ die globalen Temperaturen sinken.

Die Temperaturen aus Modellsimulationen werden in der Regel durch Veränderungen der Treibhausgase, der Sonneneinstrahlung, der Eisschilde und der Süßwasserflüsse gesteuert, um nur einige zu nennen. Die modellierten Temperaturprofile verlaufen parallel zum globalen CO₂-Trend mit einem starken R² von 0,7, was bestätigt, dass CO₂ ein wichtiger

Modellkontrollknopf ist. Außerdem ähneln die modellierten Temperaturen des Holozäns tendenziell den gegenläufigen Temperaturtrends in der Antarktis (vgl. Abbildungen 1a und 3a).

Wissenschaftler haben damit begonnen, die Auswirkungen und die mögliche Dominanz anderer Antriebsfaktoren als CO₂ zu untersuchen. Zhang (2022) modellierte den Einfluss der jahreszeitlichen Sonneneinstrahlung und fand eine bessere Übereinstimmung mit den Proxydaten, wenn man die Sonneneinstrahlung mit dem Eisschildantrieb kombinierte, wenn auch noch nicht perfekt. Thompson, 2022, zeigte, dass ein größerer Einfluss der Vegetation auf der Nordhalbkugel den Modellen hilft, ein holozänes Klimaoptimum zu simulieren, das in den Proxydaten deutlich wird. Die enge Beziehung zwischen CO₂ und der antarktischen Temperatur deutet darauf hin, dass die Jahrtausendschwankungen stark von Prozessen im Südlichen Ozean beeinflusst werden. Nur wenn vergangene Einflüsse und der Zeitpunkt ihrer Dominanz genauer in die Klimasimulationen einbezogen werden, werden die Modelle in der Lage sein, künftige Klimaänderungen vorherzusagen.

Beobachtungen

Es wird immer wieder behauptet, dass der Klimawandel weitgehend durch Treibhausgase, insbesondere CO₂, gesteuert wird. Dies wurde zum Teil durch die starke Beziehung zwischen CO₂ aus antarktischen Eiskernblasen und lokalen antarktischen Temperaturtrends belegt. Während CO₂ die antarktischen Temperaturen sehr gut nachahmt, zeigen neunzig Prozent der Temperaturtrends an der Erdoberfläche während des Holozäns keine positive Korrelation zu CO₂. Die Temperaturen in der Arktis und der nördlichen Hemisphäre sinken bei steigenden CO₂-Werten. Tropische Proxy-Temperaturen scheinen nicht durch CO₂ beeinflusst zu werden.

Von Modellen simulierte Temperaturen, die stark von CO₂ beeinflusst werden, stimmen nicht genau mit den globalen Proxy-Temperaturen des Holozäns überein und neigen dazu, weitgehend antarktische Trends widerzuspiegeln. Die Tatsache, dass CO₂ nur für die Antarktis, d. h. <10 % der Erdoberfläche, gut mit den Temperaturen des Holozäns korreliert, aber dennoch als dominierender Einfluss auf den Klimawandel angesehen wird, ist ein wissenschaftliches Dilemma.

Download the bibliography [here](#).

Link:

<https://andymaypetrophysicist.com/2023/05/26/the-holocene-co2-dilemma/>

Übersetzt von Christian Freuer für das EIKE