

JAN ESPER^{1,2} und ULF BÜNTGEN^{2,3,4}

¹ Geographisches Institut, Johannes Gutenberg-Universität, 55099 Mainz, Deutschland

² Global Change Research Institute, Akademie der Wissenschaften, 603 00 Brünn, Tschechische Republik

³ Institut für Geographic, Universität Cambridge, Cambridge CB2 3EN, Großbritannien

⁴ Institut für Geographic, Masaryk Universität, 613 00 Brünn, Tschechische Republik

Zum Vergleich der anthropogenen Erwärmung mit den Temperaturen der letzten 125.000 Jahre durch das IPCC

1 Zusammenfassung

In seinem letzten Bericht kommt das IPCC zu dem Schluss, dass das letzte Jahrzehnt wärmer war als jeder mehrhundertjährige Zeitraum der letzten 125.000 Jahre. Diese Aussage basiert auf einem Vergleich instrumenteller Messungen mit rekonstruierten Temperaturen, die aus sogenannten Proxy-Archiven wie See- und Meeressedimenten und Torfmooren abgeleitet wurden. Wir besprechen hier diesen Vergleich mit Fokus auf den zahlreichen Proxy-Zeitreihen, die verwendet wurden, um das Klima des Holozäns seit 12.000 Jahren und der davor liegenden Eiszeit (125.000 Jahre) zu rekonstruieren. Die Proxydaten stellen eine einzigartige Quelle für die Analyse langfristiger Klimaveränderungen dar, verfügen jedoch nicht über die zeitliche Auflösung und Datierungsgenauigkeit, um aktuelle Temperaturtrends mit vorinstrumentellen Warmzeiten in Beziehung zu setzen. Demnach kann die Schlussfolgerung des IPCC hinsichtlich der Einzigartigkeit der letzten zehn Jahre nicht durch einen Vergleich mit den geglätteten Paläotemperaturen des Holozäns validiert werden. Wir argumentieren, dass die Vermutung des IPCC dennoch wahrscheinlich richtig ist, da die ebenfalls aus Proxydaten rekonstruierten Treibhausgaskonzentrationen zu keinem Zeitpunkt des Holozäns erhöht waren.

2 Hintergrund und Motivation

Die Arbeitsgruppe 1 des IPCC [1] hat in ihrer technischen Zusammenfassung eine Abbildung aufgenommen, die einen Vergleich (i) der global gemessenen Temperaturen seit 1900 n. Chr. mit (ii) einer jährlich aufgelösten, überwiegend auf Baumringen basierenden Rekonstruktion von 1000-1900 n. Chr. und (iii) einer geglätteten, proxy-basierten Rekonstruktion von 10.000 v. Chr. bis 1000 n. Chr. zeigt (**Abbildung 1**). Die Abbildung veranschaulicht, dass die im letzten Jahrzehnt von 2011 bis 2020 aufgezeichneten Temperaturen den Bereich der rekonstruierten Temperaturen während des Mittelholozäns, mit seinem Höhepunkt um etwa 4.500 v. Chr., übersteigen. Letzteres stellt das sogenannte Holozäne Optimum (HOP) dar, während dem die Temperaturen aufgrund spezifischer Orbitalparameter erhöhte waren [2,3]. Da dem Holozän die Letzte Eiszeit vorausgeht und die letzten 6000 Jahre durch einen langfristigen Abkühlungstrend mit Kulmination in der Kleinen Eiszeit vom 15. bis 19. Jahrhundert endete (siehe grüne Kurve in **Abbildung 1**), enthielt die Darstellung im IPCC

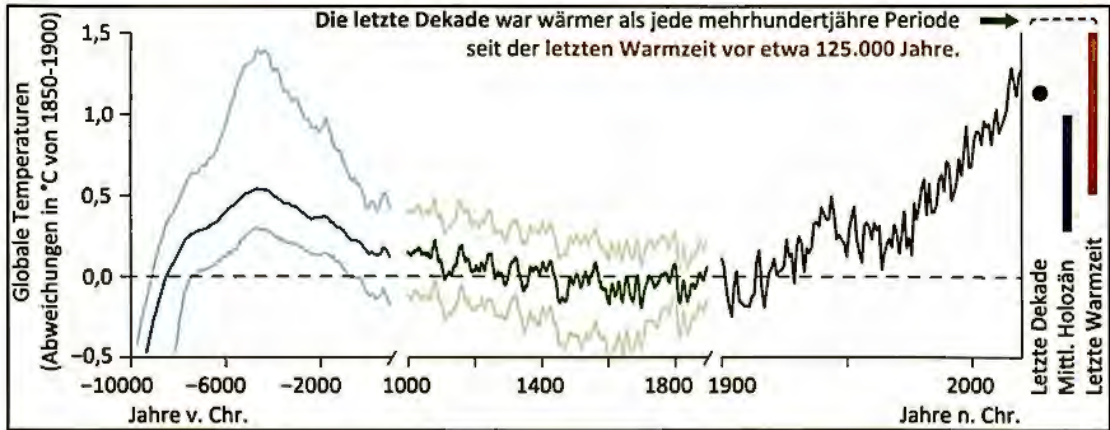


Abb. 1: Gemessene und rekonstruierte Temperaturen seit 10.000 Jahren v. Chr. nach der technischen Zusammenfassung des IPCC AR6 (S. 61). Die violette Kurve zeigt die instrumentellen Temperaturen seit 1900 n. Chr. in jährlicher Auflösung (Daten von HadCRUT) [6]. Die grünen und blauen Kurven sind Temperaturrekonstruktionen aus Proxydaten, von 1000-1900 n. Chr. in dekadischer und davor in mehrhundertjähriger Auflösung [7,8]. Die hellen Kurven sind Unsicherheits-schätzungen. Alle Temperaturen sind als Abweichungen zum Referenzzeitraum von 1850-1900 n. Chr. dargestellt.

Bericht eine Aussage, wonach das letzte Jahrzehnt wärmer gewesen sei als jeder mehrhundertjährige Zeitraum der letzten 125.000 Jahre.

Diese Aussage bildete die Basis für eine öffentliche Diskussion über rekordverdächtige Wärmeereignisse, wie etwa den 4. Juli, der als der heißeste Tag und die Woche vom 3. bis 10. Juli als die heißeste Woche seit über 100.000 Jahren beschrieben wurde [4,5]. Während es außer Frage steht, dass diese Temperaturextreme durch Treibhausgase verursacht und durch ein El Niño Ereignis verstärkt wurden, bleibt unklar, warum der IPCC ein einzelnes Jahrzehnt mit Bedingungen über mehrere Jahrhunderte vergleicht? Wir gehen hier dieser Fragen nach, indem wir typische Merkmale der zugrunde liegenden Proxydaten besprechen, die zur Rekonstruktion der globalen Temperaturen seit 10.000 v. Chr. verwendet wurden. Dabei konzentrieren wir uns auf die räumliche Repräsentativität, Datendichte und die zeitliche Auflösung des globalen Holozän-Proxy-Netzwerks mit dem Ziel, Hinweise auf die Möglichkeiten und Grenzen der Kontextualisierung jüngster Extremereignisse zu geben.

3 Datenquellen und Methoden

Gemessene und rekonstruierte Temperaturen in der IPCC-Abbildung

Die in **Abbildung 1** gezeigten instrumentellen Daten sind eine Kombination aus Lufttemperaturen, die in weißen Kästen etwa 2 Meter über dem Boden gemessen wurden, mit Temperaturen der Meeresoberflächen, die in den oberen paar Metern der Ozeane gemessen wurden. Während sich die täglichen Messverfahren, Instrumente und Anzahl an Datenpunkten in den letzten 120 Jahren dramatisch geändert haben [6,9,10], gelten die dargestellten Trends als hochpräzise und dokumentieren eindrücklich einen durch Treibhausgase verursachten Temperaturanstieg von $>1^{\circ}\text{C}$. Dieser instrumentellen Periode geht Rekonstruktion der globalen Sommertemperaturen zurück ins Jahr 1000 n. Chr. voraus, die hauptsächlich auf jährlich aufgelösten Baumringdaten beruhte und hier geglättet wurde, um die Variabilität im Jahrzehntmaßstab hervorzuheben. Diese Zeitreihe deckt sich anderen großräumigen Rekonstruktionen [11-13], die wärmere Bedingungen im Mittelalter zeigen, gefolgt von einem Abkühlungstrend bis in die Kleine Eiszeit, die im 15.-19. Jahrhundert ihren Höhepunkt erreichte. Vor 1000 n. Chr. zeigen die Proxi-Daten etwa $0,5^{\circ}\text{C}$ wärmere Bedingungen während der HOP, dessen Zentrum um 4500 v. Chr. lag und dem deutlich kältere Temperaturen am Übergang von der letzten Eiszeit ins Holozän vorausgingen. Ein Vergleich der Bedingungen im mittleren Holozän mit den gemessenen Temperaturen von 2011 bis 2020 (siehe die Balken und Symbole auf der rechten Seite von **Abbildung 1**) verdeutlicht, dass das letzte Jahrzehnt außerhalb des natürlich Schwankungsbereichs, zurück bis zur letzten Warmzeit vor 125.000 Jahren, liegt.

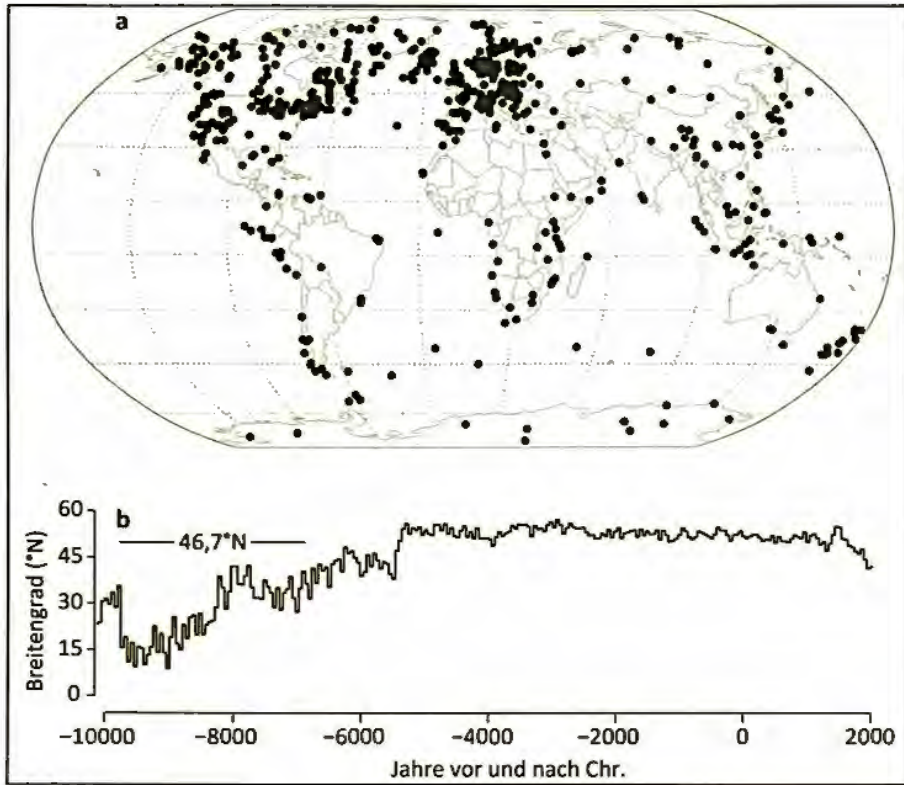


Abb. 2: Standorte der 1319 Proxy-Datensätze, die zur Rekonstruktion Holozäner Temperaturen verwendet wurden (a) und die sich ändernde Breitengradmittelwerte, berechnet in 50-Jahres-Intervallen seit 10000 v. Chr. (b). 46,7° N ist der durchschnittliche Breitengrad des Proxy-Netzwerks während des gesamten Holozäns.

Holozäne Proxydaten

Die in der IPCC-Figur dargestellte Temperaturkurve für das Holozän fasst die Information von 1319 Proxy-Datensätzen von 679 Standorten aus der ganzen Welt zusammen (Abbildung 2). Allerdings liegt der Breitenkreismittelwert dieses Netzwerks bei 46,7°N, was die Wiedergabe der Bedingungen in den Tropen und der südlichen Hemisphäre erschwert. Der Netzwerkmittelwert verschiebt sich vor 5500 v. Chr. sukzessive von 50°N nach 15°N, wenn mehrere kürzere Proxy-Datensätze aus den hohen nordischen Breiten wegfallen. Die Mehrheit der in diesem Netzwerk verwendeten Proxys stammt aus Seesedimenten (54%), gefolgt von Meeressedimenten (27%), Torfmooren (15%) und anderen Archiven (4%). 46% der Proxys repräsentieren Jahresmitteltemperaturen, während 34% Sommertemperaturen und

20% Wintertemperaturen abbilden, weshalb die globale Zusammenfassung solcher Daten durch die raum-zeitliche Verteilung von Sommer und Winter verkompliziert wird [14-17].

Besprechung einzelner Proxy-Datensätze

Die im globalen Netzwerk enthaltenen Proxydaten wurden über mehrere Jahrzehnte von Dutzenden Forschungsteams entwickelt und sind das Ergebnis von Hunderten Feld-, Mess- und Analysekampagnen. Sie bilden das eigentliche Rückgrat jeder Analyse der Klimavariabilität im Holozän und dienen als Blaupause für die Klimamodellierung [18]. Jeder Temperaturdatensatz aus diesen Kampagnen, abgeleitet aus Pollenzählungen, stabilen Isotopen, Alkanonen, Zuckmücken oder anderen Proxys, stellt eine individuelle Zeitreihe mit einzigartigen Merkmalen dar. Um diese Vielfalt zu würdigen, zeigen wir hier sechs der 1319 im IPCC-Bericht verwendeten Proxy-Datensätze in ihrer ursprünglichen Form in °C, um Unterschiede in Varianz, Auflösung und Saisonalität zu besprechen (Abbildung 3).

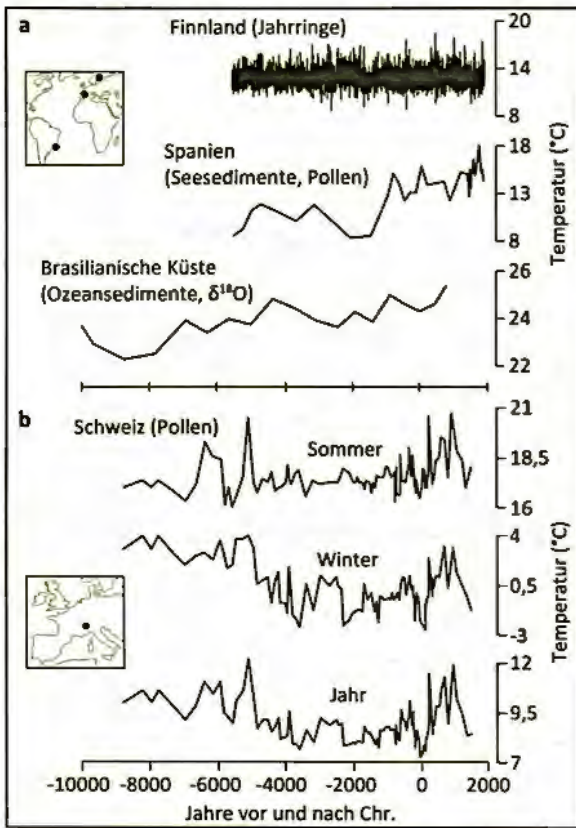


Abb. 3: Proxydaten unterschiedlicher zeitlicher Auflösung und Saisonalität. **a,** Eine Rekonstruktion der Sommertemperatur in jährlicher Auflösung aus Baumjahrringen in Nordfinnland [20]. Eine Rekonstruktion der Jahresmitteltemperatur mit einer zeitlichen Auflösung von 167 Jahre aus Pollenzählungen eines 206 cm langen Seesediment-Bohrkerns aus Spanien [21] und eine Rekonstruktion der Jahresmitteltemperaturen mit einer geringeren zeitlichen Auflösung von 640 Jahre aus $\delta^{18}\text{O}$ Isotopen eines 208 cm langen Bohrkerens vor der brasilianischen Küste [22]. **b,** Die obere und mittlere Kurve zeigen Rekonstruktionen der Sommer- und Wintertemperaturen auf Grundlage von Pollenzählungen eines 723 cm langen Seesediment-Bohrkerns aus der Schweiz [23]. Die untere Kurve repräsentiert die Jahresdurchschnittstemperaturen, abgeleitet aus dem Mittelwert der Sommer- und Winterrekonstruktionen.

Die Baumringchronologie aus Nordfinnland (oberste Kurve in **Abbildung 3**) hat eine hohe zeitliche Auflösung, allerdings sind die rekonstruierten Sommertemperaturen auf diese Jahr-zu-Jahr

Variationen begrenzt, da die dendrochronologische Bearbeitung dieser Daten langfristige Temperaturentrends eliminiert hat [19]. Solche Zeitreihen können daher nicht zum Verständnis langfristiger Temperaturentwicklungen während des Holozäns beitragen. Die zweite Zeitreihe, eine pollenbasierte Temperaturentwicklung aus Seesedimenten in Spanien, entspricht exakt der durchschnittlichen zeitlichen Auflösung aller Proxys aus dem Holozänen Netzwerk (165 Jahre). Der zunehmende Abstand zwischen den einzelnen Datenpunkten – von mehr Datenpunkten im zweiten Jahrtausend n. Chr. zu nur wenigen Punkten vor 1000 v. Chr. – ist für viele Holozäne Proxys charakteristisch. Die $\delta^{18}\text{O}$ -Zeitreihe aus Meeressedimenten vor der brasilianischen Küste repräsentiert einen Proxy mit geringer zeitlicher Auflösung von 640 Jahren zwischen den einzelnen Datenpunkten. Solche Rekonstruktionen mit eher niedriger zeitlicher Auflösung wurden vor allem in der spärlich repräsentierten Südhemisphäre und den Tropen berücksichtigt.

Das zweite Beispiel (**Abbildung 3b**) zeigt, wie eine Rekonstruktion der Jahresdurchschnittstemperatur durch einfache Mittelbildung zweier saisonaler Rekonstruktionen erstellt wurde, in diesem Fall basierend auf Pollenzählungen aus einem See in der Schweiz. Während die Sommerzeitreihe einen Mittelwert von $\sim 18,5^\circ\text{C}$ hat und einen moderaten Erwärmungstrend zeigt, liegt die Winterzeitreihe bei $\sim 0,5^\circ\text{C}$ und zeigt einen langfristigen Abkühlungstrend. Durch Mitteln dieser Aufzeichnungen werden diese Trendgegensätze aufgehoben und die resultierende Zeitreihe liegt bei $\sim 9^\circ\text{C}$. Dieses einfache Verfahren zur Erstellung von Jahresmitteltemperaturen wurde im globalen Proxy-Netzwerk häufig angewandt (betrifft 43% aller Jahresmittelwert-Rekonstruktionen) und beeinflusst die Evaluation saisonal variierender, orbitaler Strahlungsänderungen auf das Klima [3].

4 Replikation und zeitliche Auflösung

Die unterschiedliche Länge und zeitliche Auflösung der einzelnen Proxy-Zeitserien beeinflussen die Berechnung der mittleren Belegungskurven (Replikation) des holozänen Netzwerks. Betrachtet man den gesamten Zeitraum, der von allen 1319 Proxys abgedeckt wird, nimmt die Replikation zur Gegenwart stark ab (**Abbildung 4a**). Dem ging ein Plateau bei etwa 1280 Zeitserien von 2154–627 v. Chr., ein stetiger Rückgang bis 8700 v. Chr. und davor eine Reduktion auf ~ 400 Reihen voraus. Diese Illustration der Replikation behandelt jedoch jeden Proxy-Datensatz als kontinuierliche Zeitreihe und spiegelt nicht die sich ändernde zeitliche

Auflösung der einzelnen Datensätze wider. Die Auswirkungen dieser individuellen Merkmale werden sichtbar, wenn man die Anzahl der Proxy-Datenpunkte in 50-Jahres-Blöcken berechnet (**Abbildung 4b**). Diese Kurve verdeutlicht, dass das globale Netzwerk durch eine stetige Abnahme der

einzelnen Datenpunkten von 151 auf 184 Jahre in (**Abbildung 5**). Dieser letzte Befund zeigt demnach, dass längere Proxy-Zeitreihen im Mittel zeitlich gröber aufgelöst sind. Ähnliche Muster finden wir auch räumlich, da der durchschnittliche Abstand zwischen den Proxy-Datenpunkten in der

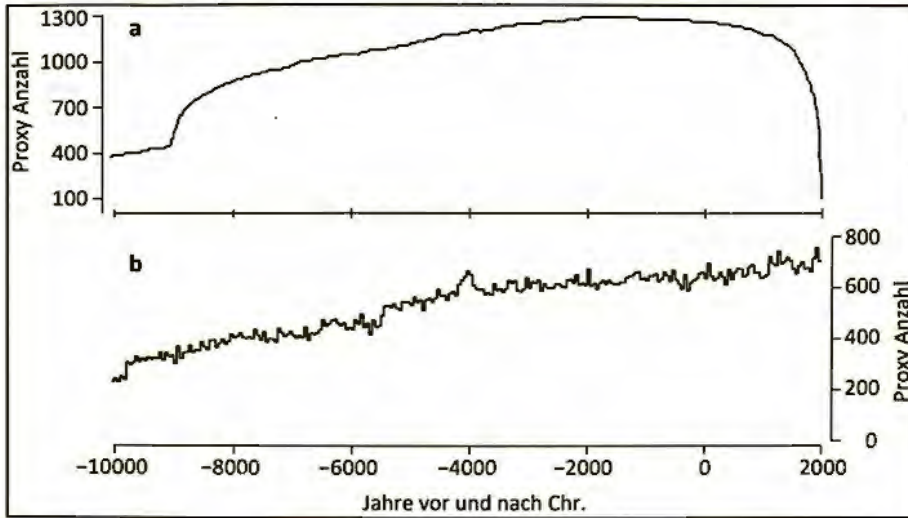


Abb. 4: Replikation des holozänen Proxy-Netzwerks seit 10.000 v. Chr., a) unter Berücksichtigung der Zeiträume, die von jedem der 1.319 Proxy-Datensätze im globalen Netzwerk abgedeckt werden, und b) unter Berücksichtigung der Summe der Proxy-Werte in 50-Jahres-Blöcken über die letzten 12.000 Jahre. Letzteres ist eine Zählung der Datenpunkte über alle Proxy-Datensätze hinweg und berücksichtigt nicht die linearen Interpolationen zwischen den Datenpunkten in jedem der Datensätze.

Replikation von >750 auf <250 Proxys in den letzten 12000 Jahren gekennzeichnet ist. Der langfristige Rückgang der Netzwerkreplikation ist das Ergebnis (i) des Wegfalls kürzerer Zeitreihen und (ii) einer Vergrößerung des Abstands zwischen den

nördlichen Hemisphäre nur 157 Jahre beträgt, in der südlichen Hemisphäre jedoch auf 203 Jahre und in den Tropen auf 205 Jahre ansteigt.

5 Konsequenzen für die Einordnung rezenter Erwärmungstrends

Die insgesamt niedrige (165 Jahre) und in die Vergangenheit abnehmende (bis zu 184 Jahre) zeitliche Auflösung des globalen Proxy-Netzwerks, sowie die generell hohe und in die Vergangenheit zunehmende Datierungsunsicherheit (schematisch dargestellt in **Abbildung 5**), glätten die von diesen Daten abgeleiteten Temperaturrekonstruktionen des Holozäns und verunmöglichen Vergleiche mit kurzfristigen Temperaturbeobachtungen der letz-

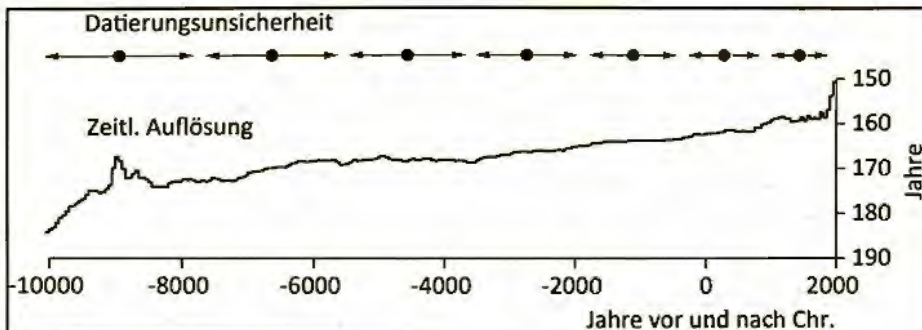


Abb. 5: Zeitliche Auflösung des Proxy-Netzwerks und Datierungsunsicherheit. Die Pfeile zeigen schematisch die sich ändernde Datierungsunsicherheit einzelner Datenpunkte, die für holozäne Proxys charakteristisch ist. Die untere Kurve zeigt die abnehmende mittlere zeitliche Auflösung (also den Abstand zwischen den Datenpunkten) in den letzten 12.000 Jahre.

ten Jahre [25,26]. Wir argumentieren daher, dass Vergleiche von instrumentellen Temperaturen im Bereich von Jahrzehnten mit aus Proxys abgeleiteten Temperaturen im Bereich von Jahrhunderten, wie sie im letzten IPCC-Bericht gemacht wurden, keine Aussagekraft haben. Das bedeutet nicht,

dass solche Aussagen zwingend falsch sind, sondern dass uns schlicht die entsprechenden Daten fehlen, die für die Validierung solcher Aussagen erforderlich sind. Die Limitierung Holozäner Rekonstruktion, Temperaturschwankungen im Jahrzehntebereich oder sogar über noch kürzere Zeiträume darzustellen, wird durch den halblogarithmischen Maßstab der x-Achse der IPCC-Figur verschleiert (**Abbildung 1**). Eine lineare Skalierung hingegen (**Abbildung 6**) macht die unterschiedlichen Charakteristika von hochvariablen, kurzfristigen Instrumentaldaten gegenüber geglätteten, langfristigen Proxydaten deutlich und veranschaulicht die Sinnlosigkeit des Vergleichs eines einzelnen Jahrzehnts mit Mittelwerten über Jahrhunderte.

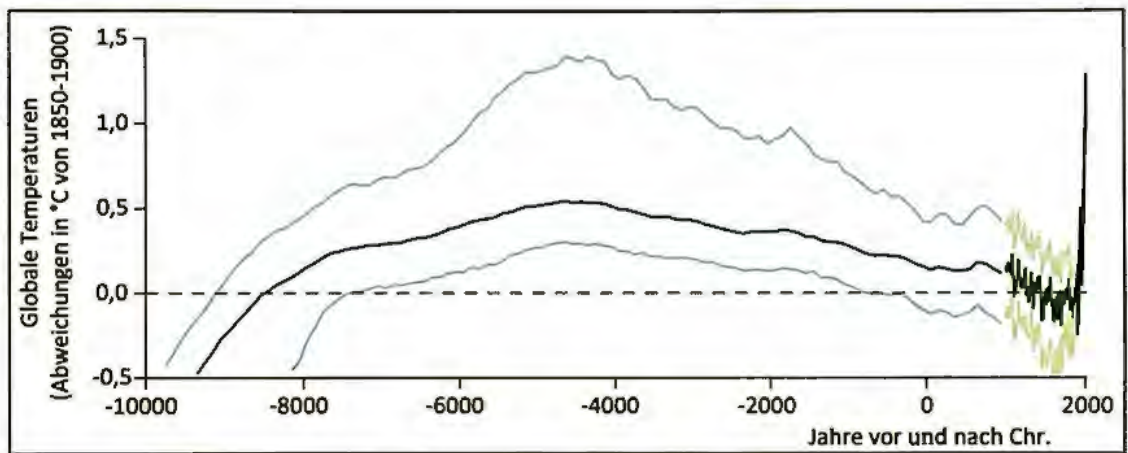


Abb. 6: Nachdruck von **Abbildung 1**, jedoch mit einer linearen statt einer halblogarithmischen x-Achse.

6 Schlussfolgerungen

Die zahlreichen Proxy-Datensätze, die in den letzten Jahrzehnten entwickelt wurden, bilden das Rückgrat für unser Verständnis Holozäner Temperaturen und dienen als Blaupause für Analysen mit Klimamodellen [27]. Obwohl die abgeleiteten Temperaturmittelkurven eine einzigartige Informationsquelle darstellen, können sie nicht zum Vergleich kurzfristiger Temperaturschwankungen der letzten zehn Jahre verwendet werden. Dies liegt daran, dass die Variabilität globaler Temperaturrekonstruktionen für das Holozän aufgrund der geringen zeitlichen Auflösung und hohen Datierungsunsicherheiten der zugrunde liegenden Proxys stark gedämpft ist. Aussagen wonach das

letzte Jahrzehnt wärmer war als jeder mehrhundertjährige Zeitraum in den letzten 125000 Jahren, sind daher irreführend und sollten bei der Bewertung zukünftiger Forschungsprioritäten vernachlässigt werden. Im Gegenteil: Aufgrund unseres begrenzten Verständnisses der Temperaturvariabilität im gesamten Holozän sollten Forschungsvorhaben gefördert werden, die darauf abzielen, bestehende Proxy-Zeitreihen zu verbessern und neue Proxy-Zeitreihen unter Verwendung modernster Methoden zu entwickeln.

In ihrer grundlegenden Arbeit zum Klima des Holozäns dokumentierten Marcott et al. (2013) bereits vor über zehn Jahren, dass die globale Temperaturrekonstruktion für Zeiträume von weniger als 300 Jahren keine nennenswerte Variabilität aufweist [14]. Unsere Analyse ist im Grunde lediglich eine Erinnerung an diese Aussage und unterstreicht unser begrenztes Wissen bei der Einordnung moderner Temperaturextreme in einen langfristigen zeitlichen Kontext. Vor dem Hintergrund

dieser Kritik möchten wir gleichzeitig daran erinnern, dass die Annahme des IPCC zur Einzigartigkeit der Temperaturen des letzten Jahrzehnts durchaus zutreffen könnte, denn hochauflösende, aus polaren Eiskernen extrahierte Rekonstruktionen zeigen eindeutig, dass die global verteilten Treibhausgase zu keinem Zeitpunkt während des Holozäns auf Werte angestiegen sind, wie sie nun

im Anthropozän erreicht wurden (**Abbildung 7**). Die Variabilität dieser Rekonstruktionen ist nicht durch die Mittelung hunderter Proxys mit unterschiedlicher zeitlicher Auflösung und Datierungsunsicherheit verwischt worden, wie dies bei den globalen Temperaturkurven des Holozäns der Fall ist.

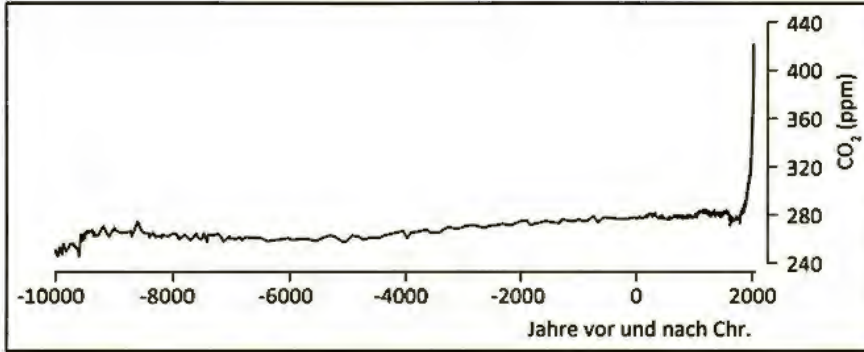


Abb. 7: Gemessene und rekonstruierte atmosphärische CO₂ Konzentrationen vom Mauna Loa Observatorium auf Hawaii sowie den Law Dome, WAIS Divide und EPICA Dome Eisbohrkernen aus der Antarktis seit 10000 Jahren v. Chr. [28]. Aufgrund der schnellen Ausbreitung von atmosphärischem CO₂ sind Daten von einzelnen Standorten global repräsentativ.

Danksagung Wir danken Philipp Schulz, Matt Osman, Freddy Reinig, Max Torbeson, Mirek Trnka und Heinz Wanner. Unterstützt durch das ERC Advanced Projekt „Monostar“ (#882727) und das ERC Synergy Projekt ERC „Plague“ (#101118880).

Quellenverzeichnis

1. IPCC. Climate change 2021: The physical science basis. In Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change; Masson-Delmotte, V.P., Zhai, A., Pirani, S.L., Connors, C., Péan, S., Berger, N., Caud, Y., Chen, L., Goldfarb, M.I., Gomis, M., et al., Eds.; Cambridge University Press: Cambridge, UK, 2021.
2. Wanner, H.; Beer, J.; Bütikofer, J.; Crowley, T.J.; Cubasch, U.; Flückiger, J.; Goosse, H.; Grosjean, M.; Joos, F.; Kaplan, J.O.; et al. Mid-to Late Holocene climate change: An overview. *Quat. Sci. Rev.* 2008, 27, 1791–1828.
3. Esper, J.; Frank, D.C.; Timonen, M.; Zorita, E.; Wilson, R.; Luterbacher, J.; Holzkämper, S.; Fischer, N.; Wagner, S.; Nievergelt, D.; et al. Orbital forcing of tree-ring data. *Nat. Clim. Chang.* 2012, 2, 862–866.

4. The Guardian. Available online: <https://www.theguardian.com/world/2023/jul/16/red-alert-the-worlds-hottest-week-ever-and-more-is-to-forecast-to-come/> (accessed on 28 July 2023).
5. The Washington Post. Available online: <https://www.washingtonpost.com/climate-environment/2023/07/05/hottest-day-ever-recorded/> (accessed on 28 July 2023).
6. Morice, C.P.; Kennedy, J.J.; Rayner, N.A.; Winn, J.P.; Hogan, E.; Killick, R.E.; Dunn, R.J.H.; Osborn, T.J.; Jones, P.D.; Simpson, I.R. An updated assessment of near-surface temperature change from 1850: The HadCRUT5 data set. *J. Geophys. Res. Atmos.* 2021, 126, e2019JD032361.

7. Neukom, R.; Barboza, L.A.; Erb, M.P.; Shi, F.; Emile-Geay, J.; Evans, M.N.; Franke, J.; Kaufman, D.S.; Lücke, L.; Rehfeld, K.; et al. Consistent multi-decadal variability in global temperature reconstructions and simulations over the Common Era. *Nat. Geosci.* 2019, 12, 643.
8. Kaufman, D.; McKay, N.; Routson, C.; Erb, M.; Dätwyler, C.; Sommer, P.S.; Heiri, O.; Davis, B. Holocene global mean surface temperature, a multi-method reconstruction approach. *Sci. Data* 2020, 7, 201.
9. Parker, D.E. Effects of changing exposure of thermometers at land stations. *Int. J. Climatol.* 1994, 14, 1–31.
10. Parker, D.; Horton, B. Uncertainties in central England temperature 1878–2003 and some improvements to the maximum and minimum series. *Int. J. Climatol.* 2005, 25, 1173–1188.
11. Anchukaitis, K.J.; Smerdon, J.E. Progress and uncertainties in global and hemispheric temperature reconstructions of the Common Era. *Quat. Sci. Rev.* 2022, 286, 107537.
12. Esper, J.; George, S.S.; Anchukaitis, K.; D'Arrigo, R.; Ljungqvist, F.C.; Luterbacher, J.; Schneider, L.; Stoffel, M.; Wilson, R.; Büntgen, U. Large-scale, millennial-length temperature reconstructions from tree-rings. *Dendrochronologia* 2018, 50, 81–90.
13. Esper, J.; Büntgen, U. The future of paleoclimate. *Clim. Res.* 2021, 83, 57–59.
14. Marcott, S.A.; Shakun, J.D.; Clark, P.U.; Mix, A.C. A reconstruction of regional and global temperature for the past 11,300 years. *Science* 2013, 339, 1198–1201.
15. Rehfeld, K.; Trachsel, M.; Telford, R.J.; Laepple, T. Assessing performance and seasonal bias of pollen-based climate reconstructions in a perfect model world. *Clim. Past* 2016, 12, 2255–2270.
16. Bova, S.; Rosenthal, Y.; Liu, Z.; Godad, S.P.; Yan, M. Seasonal origin of the thermal maxima at the Holocene and the last interglacial. *Nature* 2021, 589, 548–553.
17. Osman, M.B.; Tierney, J.E.; Zhu, J.; Tardif, R.; Hakim, G.J.; King, J.; Poulsen, C.J. Globally resolved surface temperatures since the Last Glacial Maximum. *Nature* 2021, 599, 239–244.
18. Bader, J.; Jungclaus, J.; Krivova, N.; Lorenz, S.; Maycock, A.; Raddatz, T.; Schmidt, H.; Toohey, M.; Wu, C.-J.; Claussen, M. Global temperature modes shed light on the Holocene temperature conundrum. *Nat. Commun.* 2020, 11, 4726.
19. Esper, J.; Cook, E.R.; Schweingruber, F.H. Low-frequency signals in long tree-ring chronologies for reconstructing past temperature variability. *Science* 2002, 295, 2250–2253.
20. Helama, S.; Timonen, M.; Holopainen, J.; Ogurtsov, M.G.; Mielikäinen, K.; Eronen, M.; Lindholm, M.; Meriläinen, J. Summer temperature variations in Lapland during the Medieval Warm Period and the Little Ice Age relative to natural instability of thermohaline circulation on multi-decadal and multi-centennial scales. *J. Quat. Sci.* 2009, 24, 450–456.
21. Marsicek, J.; Shuman, B.N.; Bartlein, P.J.; Shafer, S.L.; Brewer, S. Reconciling divergent trends and millennial variations in Holocene temperatures. *Nature* 2018, 554, 92–96.
22. Carlson, A.E.; Oppo, D.W.; Came, R.E.; LeGrande, A.N.; Keigwin, L.D.; Curry, W.B. Subtropical Atlantic salinity variability and Atlantic meridional circulation during the last deglaciation. *Geology* 2008, 36, 991–994.
23. Ammann, B. Litho- and palynostratigraphy at Lobsigensee: Evidences for trophic changes during the Holocene. *Hydrobiologia* 1986, 143, 301–307.
24. Essel, H.; Esper, J.; Wanner, H.; Büntgen, U. Rethinking the Holocene temperature conundrum. *Clim. Res.* 2024, 92, 61–64.
25. Minière, A.; von Schuckmann, K.; Sallée, J.B.; Vogt, L. Robust acceleration of Earth system heating observed over the past six decades. *Sci. Rep.* 2023, 13, 22975.
26. Voosen, P. Is the world 1.3 °C or 1.5 °C warmer? *Science* 2024, 383, 466–467.
27. Cartapanis, O.; Jonkers, L.; Moffa-Sanchez, P.; Jaccard, S.L.; de Vernal, A. Complex spatio-temporal structure of the Holocene Thermal Maximum. *Nat. Commun.* 2022, 13, 5662.
28. Köhler, P.; Nehrbass-Ahles, C.; Schmitt, J.; Stocker, T.F.; Fischer, H. A 156 kyr smoothed history of the atmospheric greenhouse gases CO₂, CH₄, and N₂O and their radiative forcing. *Earth Sys. Sci. Data* 2017, 9, 363–387.