

JAN ESPER^{1,2}, MAX C. A. TORBENSON¹ 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 Brunn, Tschechische Republik

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

⁴ Institut für Geographie, Masaryk Universität, 613 00 Brunn, Tschechische Republik

Der Extremsommer von 2023 im Kontext der letzten 2000 Jahre

1 Zusammenfassung

Geprägt durch einen außergewöhnlich warmen Sommer auf der Nordhalbkugel (NH) [1,2] wurde 2023 das heißeste Jahr seit Beginn der Wetteraufzeichnungen [3-5]. Ein Vergleich dieses Extrems mit natürlichen Klimavariationen ist allerdings schwierig, da die frühindustriellen Wetteraufzeichnungen aus dem 19ten Jahrhundert lückenhaft und mit Fehlern behaftet sind [6]. Hier vergleichen wir gemessene und rekonstruierte Juni-Juli-August (JJA) Temperaturen und belegen, dass 2023 der wärmste außertropische Sommer der NH in den letzten 2000 Jahre war und den 95%-Vertrauensbereich der natürlichen Klimavariabilität um mehr als ein halbes Grad Celsius überschritten hat. Ein Vergleich mit dem kältesten rekonstruierten Sommer im Jahr 536 n. Chr. ergibt eine maximale Temperaturamplitude von 3,93°C zwischen vorindustriellen Bedingungen und dem Jahr 2023. Obwohl die Erwärmung in 2023 aufgrund von Treibhausgasemissionen [7] und einem seit Sommer anlaufenden El Niño Ereignisses [8] durchaus erwartbar war, unterstreicht dieser neuerliche Rekord die Dringlichkeit zur Reduzierung von Treibhausgasemissionen.

2 Methoden

Es wurden monatliche Temperaturen von Berkeley Earth [9] in der Auflösung von 1°x1° verwendet, um mittlere JJA-Temperaturen für die Landflächen von 30–90°N zu berechnen. Diese Daten ähneln anderen Produkten [10,11] und repräsentieren die außertropischen Landflächen der NH mit nur einigen Stationen zurück in das Jahr 1850 n. Chr. [12]. Alle Temperaturen sind als Anomalien des Mittelwerts von 1850–1900 n. Chr. dargestellt, um Abweichungen von diesen frühen instrumentellen Bedingungen zu betonen.

Die gemessenen Temperaturen wurden mit einer 2000-jährigen Ensemble-Rekonstruktion basierend auf den neun längsten Baumringchronologien der NH kombiniert [13,14]. Die 15 Ensemble-Mitglieder und der Mittelwert dieser Rekonstruktion wurden an den Berkeley Earth 30-90°N JJA-Daten von 1901-2010 n. Chr. skaliert [15], um die natürliche Temperaturvariabilität zurück bis in das Jahr 1 n. Chr. zu dokumentieren. Die Unterschiede zwischen einzelnen Ensemble-Mitgliedern wurde berücksichtigt, um ein 95%-Vertrauensintervall zu approximieren, und die jährlichen Temperaturabweichungen vom Mittelwert von 1850-1900 n. Chr. wurden für den Vergleich mit den Beobachtungsdaten berücksichtigt. Ein Offset zwischen rekonstruierten und gemessenen JJA-Temperaturen von 0,24°C zwischen 1850 und 1900 n. Chr. wurde

bei der Einordnung des Jahres 2023 berücksichtigt, um den Wärme-Fehler in frühen instrumentellen Temperaturen zu minimieren [6].

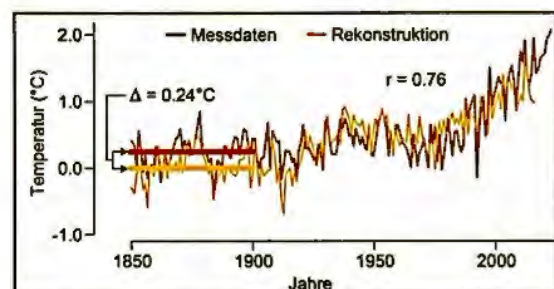


Abb. 1: Offset zwischen frühen instrumentellen Messungen und rekonstruierten Temperaturen. Vergleich der Berkeley Earth 30-90°N JJA Land-Temperaturen [9] mit rekonstruierten JJA-Temperaturen [13] seit 1850 n. Chr. Die horizontalen Linien zeigen einen Unterschied von 0,24°C zwischen 1850-1900 n. Chr. Die Rekonstruktion wurde von 1901-2010 n. Chr. an den Messdaten skaliert und beide Zeitreihen sind als Anomalien bezogen auf den Rekonstruktionsdurchschnitt von 1850-1900 n. Chr. dargestellt.

Die El Niño-Southern Oszillation (ENSO) wurde anhand der Nino 3.4 Meeresoberflächentemperaturen im zentralen Pazifik als Anomalien mit Bezug auf den Mittelwert von 1891-1920 n. Chr. approximiert [16]. Dieser Index wird über die letzten 60 Jahre von 1964-2023 n. Chr. mit den außertropischen JJA-Temperaturaufzeichnungen der NH verglichen. Dabei sind Nino 3.4 Anomalien $> 2^{\circ}\text{C}$ hervorgehoben, um starke El Niño-Bedingungen anzuzeigen (mit Ausnahme des El Niño Anfang der Jahre 1965/66 n. Chr., der nur $+1,95^{\circ}\text{C}$ erreichte). Der Zeitraum vor Mitte der 1980er Jahre war zusätzlich durch eine Verringerung der oberflächennahen Sonneneinstrahlung gekennzeichnet, die in Langzeitbeobachtungsstationen der NH aufgezeichnet wurde [17,18] und als ‚Global Dimming‘ bezeichnet wird [19].

3 Der Hitzesommer von 2023 in den Beobachtungsdaten

Instrumentelle Messungen belegen, dass die Sommertemperaturen 2023 auf den Kontinenten der NH extrem warm waren und dass diese Bedingungen global bis zum Ende des Jahres anhielten [20]. Dieser Befund kam nicht überraschend, da während des Sommers mehrere regionale Hitzewellen gemeldet wurden, die alle Tages- und Wochenrekorde übertrafen [21]. Diese Bedingungen wurden

ab der zweiten Jahreshälfte noch durch ein El Niño-Ereignis verstärkt, das warmes Oberflächenwasser über den äquatorialen Pazifik verteilte [22] und die durch Treibhausgase verursachte Wärme zusätzlich verstärkte [23].

Daten von Tausenden von Wetterstationen (siehe Methoden) zeigen, dass die JJA-Landtemperaturen von 30-90°N im Jahr 2023 um $2,07^{\circ}\text{C}$ wärmer waren als der Mittelwert zwischen 1850 und 1900 n. Chr. (Tabelle 1). Dieser alarmierende Befund zeigt nicht nur, dass 2023 der wärmste jemals in den Außertropen der NH gemessene Sommer war, sondern auch, dass das Pariser Abkommen von 2015, wonach die globale Erwärmung auf $1,5^{\circ}\text{C}$ zu begrenzen sei, in dieser räumlichen Dimension bereits überholt ist.

Tab. 1: Wärmste beobachtete und kälteste und wärmste rekonstruierte JJA-Landtemperaturen als Anomalien in $^{\circ}\text{C}$ vom rekonstruierten Mittelwert von 1850-1900 n. Chr. Die Instrumentenwerte wurden unter Berücksichtigung der Abweichung von 1850-1900 n. Chr. zwischen (kälteren) rekonstruierten und (wärmeren) beobachteten Temperaturen angepasst (siehe Methoden). Der 95%-Unsicherheitsbereich resultiert aus der Streuung zwischen den 15 Einzelrealisationen des Rekonstruktionsensembles [13].

	Jahr	JJA Temperatur	95% Bereich
Messungen	2023	$2,07^{\circ}\text{C}$	$-0,03 - 1,50^{\circ}\text{C}$ $-0,14 - 1,56^{\circ}\text{C}$ $-0,10 - 1,53^{\circ}\text{C}$ $-0,15 - 1,28^{\circ}\text{C}$ $-0,15 - 1,84^{\circ}\text{C}$ $-0,75 - 2,16^{\circ}\text{C}$ $-0,32 - 3,37^{\circ}\text{C}$ $-0,31 - 3,08^{\circ}\text{C}$
	warm	$1,93^{\circ}\text{C}$	
	1998	$1,49^{\circ}\text{C}$	
Rekonstruktion	246	$0,86^{\circ}\text{C}$	
	warm	$0,72^{\circ}\text{C}$	
	1061	$0,72^{\circ}\text{C}$	
	986	$0,70^{\circ}\text{C}$	
	kalt	$-1,24^{\circ}\text{C}$	
	1601	$-1,37^{\circ}\text{C}$	
	627	$-1,47^{\circ}\text{C}$	
	536	$-1,86^{\circ}\text{C}$	

Die Berechnung aktueller Temperaturextreme wird allerdings durch Inkonsistenzen im internationalen meteorologischen Netzwerk [24] und größere Unsicherheiten bei frühen instrumentellen Messungen [25] erschwert. Ein systematischer Vergleich von Stations- und Proxydaten hat kürzlich ergeben, dass die sogenannten „vorindustriellen“ Temperaturen des 19. Jahrhunderts, die zur Kontextualisierung der globalen Erwärmung verwendet werden, mehrere Zehntel Grad Celsius kälter waren als bis dahin angenommen [6]. Dieser

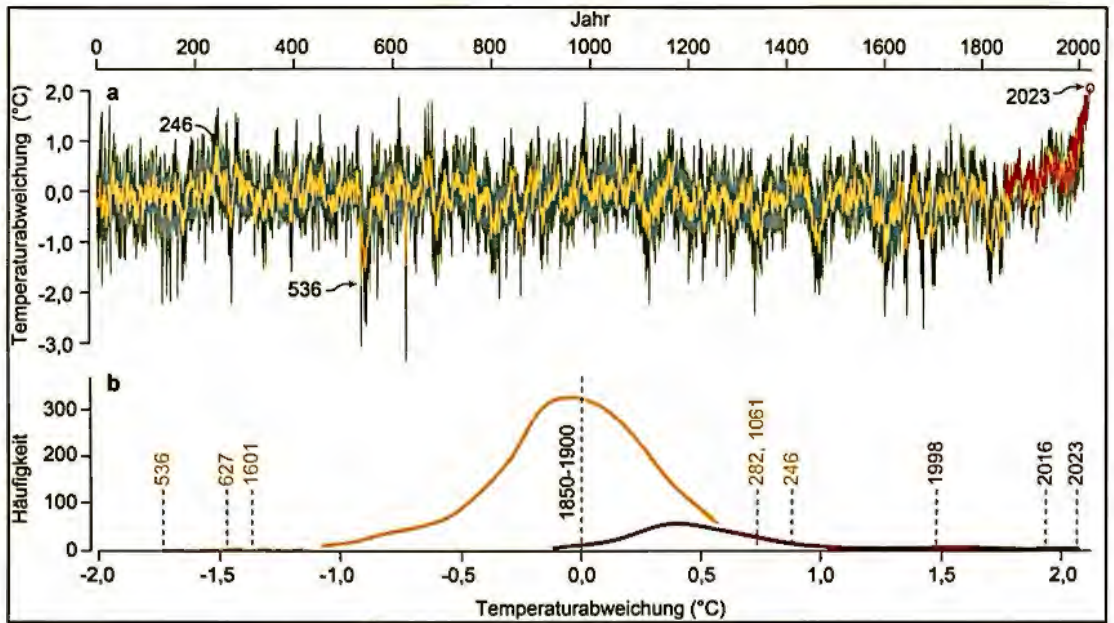


Abb. 2: 2023 im Kontext der letzten 2000 Jahre. *a*, Instrumentelle JJA-Landtemperaturen in rot [9] zusammen mit dem Mittelwert der Ensemble-Rekonstruktion in gelb und dem 95%-Unsicherheitsbereich, abgeleitet aus der Varianz zwischen den Ensemble-Mitgliedern in grau [13]. Die Ensemble-Rekonstruktionen wurden von 1901–2010 n. Chr. an den Beobachtungen skaliert und als Anomalien in Bezug auf den Mittelwert von 1850–1900 n. Chr. dargestellt (siehe Methoden). *b*, Häufigkeitsverteilungen der beobachteten und rekonstruierten Temperaturen (0°C = Mittelwert von 1850–1900 n. Chr.) mit Hervorhebung außergewöhnlich kalter und warmer Sommer.

Wärme-Fehler ist auf fehlende Stationsdaten in abgelegenen Regionen und direkte Sonneneinstrahlungseffekte auf unzureichend geschützte Thermometer zurückzuführen [26,27]. Die resultierenden Abweichungen beeinflussen allerdings auch das Pariser Klimaabkommen von 2015, dessen Ziele auf der Grundlage von Beobachtungsdaten bis zurück in das Jahr 1850 n. Chr. formuliert wurden [28].

Um diese Unsicherheiten im frühen Beobachtungsnetzwerk zu verringern, fokussieren wir unsere Berechnungen auf die Breitengrade zwischen 30–90°N, wo sich die meisten Langzeit-Wetterstationen befinden [12]. Doch selbst bei diesem eingeschränkten räumlichen Maßstab sinkt die Anzahl der in die globalen Datensätze [9–11] integrierten Stationen von Tausenden im 21.

Jahrhundert auf nur 58 von 1850–1900 n. Chr., wovon 45 in Europa lokalisiert sind. Um diese Defizite zu kompensieren, kombinieren wir die gemessenen Daten zwischen 30–90°N mit einer jährlich aufgelösten Rekonstruktion der außertropischen Sommertemperaturen [13] und berücksichtigen die Unterschiede im Proxy-Ensemble, um eine Einordnung der Extremtemperaturen im Jahr 2023 gegenüber der natürlichen Klimavariabilität zu generieren (siehe Methoden) [29–33].

4 2023 im Kontext der letzten 2000 Jahre

Ein Vergleich der rekonstruierten mit den beobachteten Temperaturen zeigt eine Abweichung von 0,24°C zwischen 1850 und 1900 n. Chr., was den dokumentierten Wärme-Fehler in den frühen Messdaten bestätigt (Abbildung 1) [6,26,27]. Diese Abweichung wird hier berücksichtigt, indem die beobachteten und rekonstruierten Sommertemperaturen auf den Rekonstruktionsmittelwert von 1850–1900 n. Chr. bezogen werden (Abbildung 2). Die resultierenden Zeitreihen zeigen, dass der Sommer 2023 den vorinstrumentellen Mittelwert von 1–1890 n. Chr. um 2,20°C übertraf. Die Änderung von 2,07°C auf Basis der Beobachtungsdaten zu 2,20°C für den Zeitraum vor 1850 n. Chr. ist auf die Berücksichtigung ausgedehnter Kaltphasen wie der spätantiken Kleine Eiszeit in der Mitte des 6ten Jahrhunderts [34] und der kleinen Eiszeit mit Höhepunkt im frühen 19ten Jahrhundert [35] zurückzuführen. Die meisten dieser

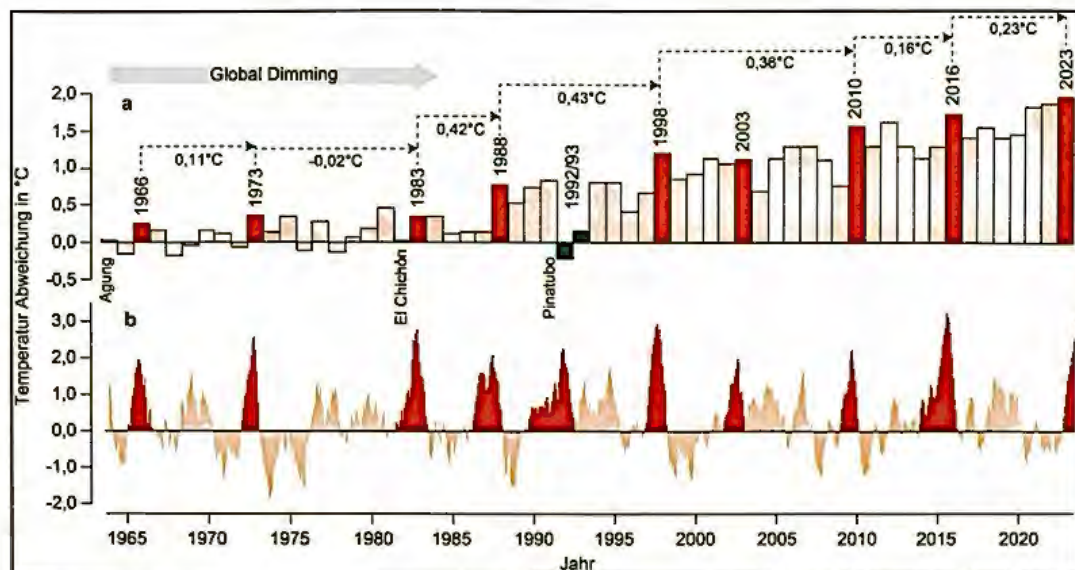


Abb. 3: Temperaturentwicklung der letzten 60 Jahre. *a*, Instrumentelle Sommertemperaturen der NH [10]. El Niño sind rot und die Jahre nach dem Pinatubo Ausbruch grau hervorgehoben. Die 'Global Dimming' Periode bis Mitte der 1980er Jahre ist mit einem Pfeil markiert [19]. Die gestrichelten Pfeile zeigen die Temperaturveränderungen zwischen El Niño-Ereignissen an (mit Ausnahme von 2003). *b*, Nino3.4 Meeresoberflächentemperaturen [16], wobei El Niño-Ereignisse $\geq 2^{\circ}\text{C}$ rot hervorgehoben sind. Alle Daten dargestellt Anomalien von der 1891–1920 Klimatologie.

Kaltphasen sowie einzelne kälteste Sommer (hervorgehoben in **Abbildung 1b**) folgten auf große, schwefelreiche Vulkanausbrüche, deren stratosphärische Aerosolschleier eine großräumige Abkühlung der Erdoberfläche verursachten [36,37]. Die vorinstrumentellen Kälte- und Wärmeeextreme sind in **Tabelle 1** dargestellt und dokumentieren das Spektrum der natürlichen Klimavariabilität der letzten 2000 Jahre. Die 95%-Unsicherheitsbereiche spiegeln die Unterschiede zwischen den 15 Realisationen des Rekonstruktionsensembles wider, die durch unterschiedliche methodische Entscheidungen der beteiligten Forschungsteams und eine Abnahme der Anzahl an Proxy-Daten zurück in die Vergangenheit determiniert werden [13]. Wenn wir nun das Jahr 2023 auf den kältesten rekonstruierten Sommer im Jahr 536 n. Chr. ($-1,86^{\circ}\text{C}$) beziehen, der wie meisten Kälteextreme durch Vulkanismus getriggert wurde [34], beträgt die maximale Amplitude der Temperaturen bis einschließlich 2023 $3,93^{\circ}\text{C}$. Die Amplitude zwischen dem wärmsten, natürlich bedingten Sommer im Jahr 246 n. Chr. ($0,88^{\circ}\text{C}$), der während der spät-römischen Warmzeit auftrat [38], und 2023 n. Chr.

($2,07^{\circ}\text{C}$) beträgt $1,19^{\circ}\text{C}$. Selbst wenn man die relativ große Unsicherheit von $-0,03$ bis $1,50^{\circ}\text{C}$ im Jahr 246 n. Chr. berücksichtigt, überschreitet der Sommer 2023 demnach den Bereich der natürlichen Klimavariabilität um mindestens $0,5^{\circ}\text{C}$. Diese Berechnung liefert eine Schätzung des Treibhausgasbeitrags eines einzelnen Extremjahres und kann als konservativ angesehen werden, da sie die höchste vorinstrumentelle Sommertemperatur aus einer großen Grundgesamtheit an Jahren seit 1 n. Chr. berücksichtigt.

5 Ursachen der jüngsten Temperaturextreme

Großräumige Temperaturanomalien können durch extreme Zustände der El Niño-Southern Oszillation (ENSO) [39] verstärkt werden. Das wird hier durch einen Vergleich der JJS-Temperaturen von $30-90^{\circ}\text{N}$ mit den Nino3.4-Meeresoberflächentemperaturen [16] der letzten 60 Jahre verdeutlicht. Demnach gehen die wärmsten Sommer der NH Außertropen mit starken El Niño-Ereignissen einher (**Abbildung 3**). Die extreme Hitze im Sommer 2023 übertraf den letzten, von El Niño beeinflussten Sommer von 2016 um $0,23^{\circ}\text{C}$, obwohl der monatliche Nino3.4-Index erst zur zweiten Jahreshälfte deutlich in Positive ausschlägt [40]. Darüber hinaus zeigen frühere Anomalien (in **Abbildung 3a** rot hervorgehoben) eine zeitliche Verzögerung zwischen extremen ENSO-Bedingungen und großräumigen Temperaturabweichungen [41]. Der hier hervorgehobene Zusammenhang zwischen El Niño Ereignissen und NH-Sommertemperaturen besteht allerdings nicht durchgehend. So führten anhaltende El Niño-Bedingungen bis tief

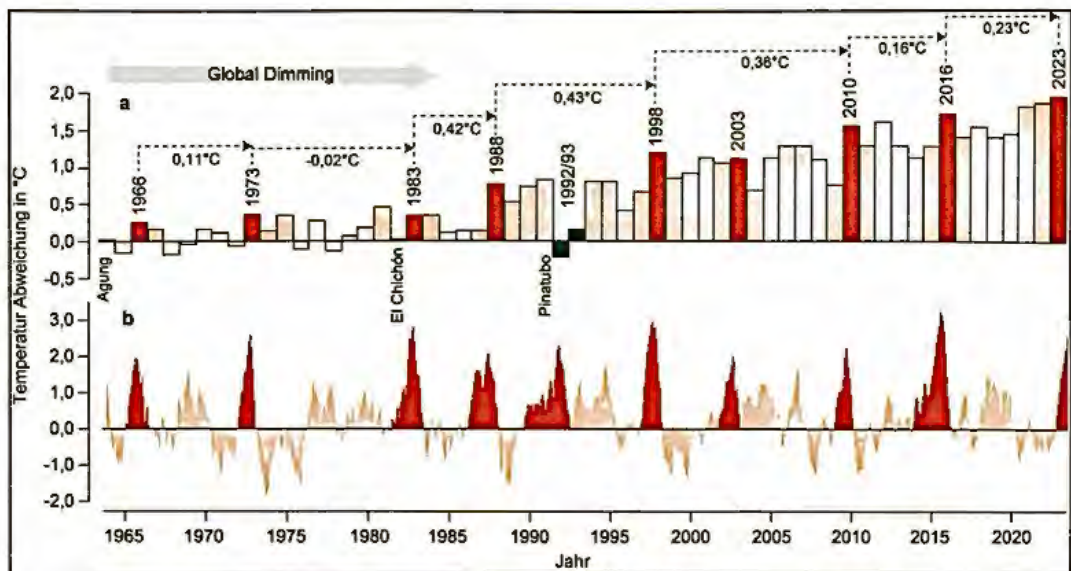


Abb. 3: Temperaturentwicklung der letzten 60 Jahre. *a*, Instrumentelle Sommertemperaturen der NH [10]. El Niño sind rot und die Jahre nach dem Pinatubo Ausbruch grau hervorgehoben. Die 'Global Dimming' Periode bis Mitte der 1980er Jahre ist mit einem Pfeil markiert [19]. Die gestrichelten Pfeile zeigen die Temperaturveränderungen zwischen El Niño-Ereignissen an (mit Ausnahme von 2003). *b*, Nino3.4 Meeresoberflächentemperaturen [16], wobei El Niño-Ereignisse $\geq 2^{\circ}\text{C}$ rot hervorgehoben sind. Alle Daten dargestellt Anomalien von der 1891–1920 Klimatologie.

Kaltphasen sowie einzelne kälteste Sommer (hervorgehoben in **Abbildung 1b**) folgten auf große, schwefelreiche Vulkanausbrüche, deren stratosphärische Aerosolschleier eine großräumige Abkühlung der Erdoberfläche verursachten [36,37]. Die vorinstrumentellen Kälte- und Wärmeextreme sind in **Tabelle 1** dargestellt und dokumentieren das Spektrum der natürlich Klimavariabilität der letzten 2000 Jahre. Die 95%-Unsicherheitsbereiche spiegeln die Unterschiede zwischen den 15 Realisationen des Rekonstruktionsensembles wider, die durch unterschiedliche methodische Entscheidungen der beteiligten Forschungsteams und eine Abnahme der Anzahl an Proxy-Daten zurück in die Vergangenheit determiniert werden [13]. Wenn wir nun das Jahr 2023 auf den kältesten rekonstruierten Sommer im Jahr 536 n. Chr. ($-1,86^{\circ}\text{C}$) beziehen, der wie meisten Kälteextreme durch Vulkanismus getriggert wurde [34], beträgt die maximale Amplitude der Temperaturen bis einschließlich 2023 $3,93^{\circ}\text{C}$. Die Amplitude zwischen dem wärmsten, natürlich bedingten Sommer im Jahr 246 n. Chr. ($0,88^{\circ}\text{C}$), der während der spät-römischen Warmzeit auftrat [38], und 2023 n. Chr.

($2,07^{\circ}\text{C}$) beträgt $1,19^{\circ}\text{C}$. Selbst wenn man die relativ große Unsicherheit von $-0,03$ bis $1,50^{\circ}\text{C}$ im Jahr 246 n. Chr. berücksichtigt, überschreitet der Sommer 2023 demnach den Bereich der natürlichen Klimavariabilität um mindestens $0,5^{\circ}\text{C}$. Diese Berechnung liefert eine Schätzung des Treibhausgasbeitrags eines einzelnen Extremjahres und kann als konservativ angesehen werden, da sie die höchste vorinstrumentelle Sommertemperatur aus einer großen Grundgesamtheit an Jahren seit 1 n. Chr. berücksichtigt.

5 Ursachen der jüngsten Temperaturextreme

Großräumige Temperaturanomalien können durch extreme Zustände der El Niño-Southern Oscillation (ENSO) [39] verstärkt werden. Das wird hier durch einen Vergleich der JJS-Temperaturen von $30^{\circ}\text{--}90^{\circ}\text{N}$ mit den Nino3.4-Meeresoberflächentemperaturen [16] der letzten 60 Jahre verdeutlicht. Demnach gehen die wärmsten Sommer der NH Außertropen mit starken El Niño-Ereignissen einher (**Abbildung 3**). Die extreme Hitze im Sommer 2023 übertraf den letzten, von El Niño beeinflussten Sommer von 2016 um $0,23^{\circ}\text{C}$, obwohl der monatliche Nino3.4-Index erst zur zweiten Jahreshälfte deutlich in Positive ausschlägt [40]. Darüber hinaus zeigen frühere Anomalien (in **Abbildung 3a** rot hervorgehoben) eine zeitliche Verzögerung zwischen extremen ENSO-Bedingungen und großräumigen Temperaturabweichungen [41]. Der hier hervorgehobene Zusammenhang zwischen El Niño Ereignissen und NH-Sommertemperaturen besteht allerdings nicht durchgehend. So führten anhaltende El Niño-Bedingungen bis tief

in das Jahr 1992 zu keinen Rekordtemperaturen, da dieses Ereignis mit dem Ausbruch des Pinatubo im Juni 1991 zusammenfiel [42]. Diese Eruption injizierte erhebliche Mengen an Sulfat-Aerosolen in die Stratosphäre, die das Sonnenlicht streuen und in der Folge die bodennahen Luftschichten abkühlen [43]. Kleinere, aber immer noch bedeutende Ausbrüche ereigneten sich 1963 (Mount Agung) und 1982 (El Chichón) [44,45]. Zweitens wurden die 1998 gemessenen und durch ein extremes El Niño-Ereignis beeinflussten Temperaturen im Jahr 2003 nicht überschritten und trugen damit zum genannten „Temperaturhiatus“ [46] bei, einem Jahrzehnt, in dem die globalen Temperaturen nicht über das Niveau des späten 20. Jahrhunderts stiegen [47]. Diese Erwärmungs-Unterbrechung endete 2010, als ein stärkeres El Niño Ereignis als 2003 auftrat und gemeinsam mit den zunehmenden Treibhausgaskonzentrationen zu einem Sprung von 0.36°C gegenüber 1998 führte. Drittens ist die ausbleibende Erwärmung bis Mitte der 1980er Jahre wahrscheinlich auf das Phänomen des ‚Global Dimming‘ [19] zurückzuführen, also der Veränderungen der atmosphärischen Transmission und Bewölkung aufgrund erhöhter Aerosolfreisetzung während des wirtschaftlichen Aufschwungs der Nachkriegszeit. Dieser negative

Strahlungsantrieb mitigierte in den 1980er Jahren, als in vor allem in Europa und Nordamerika wirk-same Maßnahmen zur Abgasreinigung eingeführt wurden [48].

Da die Variabilität der NH-Landtemperaturen größer als die der globalen Land- und Meeresoberflächentemperaturen ist, kann die hier analysierte, sub-hemisphärische Erwärmung nicht eins-zu-eins auf die globale Maßstabsebene übertragen werden. Vielmehr erschweren räumlich variierende Erwärmungsraten zwischen hohen und niedrigen Breiten und zwischen Land- und Meeresoberflächen derartige Extrapolationen. Auf der anderen Seite sind existierende Rekonstruktionen der globalen Temperaturen [49] durch die Integration von Archiven geringer zeitlicher Auflösung und unterschiedlicher saisonaler Schwerpunkte nur bedingt aussagekräftig [50] und eignen sich nicht dazu, einzelne Extremereignisse global in einen langfristigen Kontext zu stellen. Die hier ermittelte Erwärmung von 2,20°C für außertropische Sommer der NH gegenüber den vorindustriellen Bedingungen der letzten 2000 Jahre zeigt deutlich, wie beispiellos dieses Ereignis ist und wie wichtig Maßnahmen zur Einschränkung von Treibhausgasemissionen sind.

Quellenverzeichnis

- McKie, R. World experiences hottest week ever recorded and more is forecast to come, <https://www.theguardian.com/world/2023/jul/16/red-alert-the-worlds-hottest-week-ever-and-more-is-to-forecast-to-come> (2023).
- Sands, L. This July 4 was hot. Earth's hottest day on record, in fact, <https://www.washingtonpost.com/climate-environment/2023/07/05/hottest-day-ever-recorded> (2023).
- Poynting, M. & Rivault, E. 2023 confirmed as world's hottest year on record, <https://www.bbc.com/news/science-environment-67861954> (2024).
- Copernicus. 2023 is the hottest year on record, with global temperatures close to the 1.5°C limit, <https://climate.copernicus.eu/copernicus-2023-hottest-year-record> (2024).
- Bardan, R. NASA analysis confirms 2023 as warmest year on record, <https://www.nasa.gov/news-release/nasa-analysis-confirms-2023-as-warmest-year-on-record> (2024).
- Schneider, L., et al. Constraining the 19th century temperature baseline for global warming. *J. Climate* 36, 6261–6272 (2023).
- Friedlingstein, P. et al. Global carbon budget 2023. *Earth Syst. Sci. Data* 15, 5301–5369 (2023).

- Van Oldenborgh, G. J. et al. Defining El Niño indices in a warming climate. *Environ. Res. Lett.* 16, 044003 (2021).
- Muller, R. A. et al. A new estimate of the average Earth surface land temperature spanning 1753 to 2011. *Geoinfor. Geostat.: An Overview* 1, 1 (2013).
- Osborn, T. J. et al. Land surface air temperature variations across the globe updated to 2019: The CRUTEM5 data set. *J. Geophys. Res.* 126, e2019JD032352 (2021).
- Lenzen, N. J. et al. Improvements in the GISTEMP uncertainty model. *J. Geophys. Res.* 124, 6307–6326 (2019).
- Menne, M. J. The global historical climatology network monthly temperature dataset, version 4. *J. Clim.* 31, 9835–9854 (2018).
- Büntgen, U. et al. The influence of decision-making on tree ring-based climate reconstructions. *Nat. Commun.* 12, 3411 (2021).
- Data accessed via the KNMI Climate Explorer at <https://climexp.knmi.nl/start.cgi>
- Esper, J. et al. Effect of scaling and regression on reconstructed temperature amplitude for the past millennium. *Geophys. Res. Lett.* 32, L07711 (2005).
- Huang, B. et al. Extended reconstructed sea surface temperature, version 5 (ERSSTv5): upgrades, validations, and intercomparisons. *J. Clim.* 30, 8179–8205 (2017).

17. Ohmura, A. Observed decadal variations in surface solar radiation and their causes. *J. Geophys. Res.: Atmosph.* 114, D10 (2009).
18. Wild, M. Decadal changes in radiative fluxes at land and ocean surfaces and their relevance for global warming. *WIREs Clim. Change* 7, 91–107 (2016).
19. Wild, M. et al. Global dimming and brightening: A review. *J. Geophys. Res.* 114, D10 (2009).
20. Rohde, R. Global temperature report for 2023, <https://berkeleyearth.org/global-temperature-report-for-2023> (2024).
21. World Weather Attribution. Extreme heat in North America, Europe and China in July 2023 made much more likely by climate change, <https://www.worldweatherattribution.org/extreme-heat-in-north-america-europe-and-china-in-july-2023-made-much-more-likely-by-climate-change> (2023).
22. NOAA Climate Prediction Center. El Niño/La Niña home, https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/lanina (2024).
23. NOAA Global Monitoring Laboratory. Trends in atmospheric carbon dioxide, <https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/monthly.html> (2024).
24. Jones, P. D. The reliability of global and hemispheric surface temperature records. *Adv. Atmos. Sci.* 33, 269–282 (2016).
25. Frank, D. et al. Warmer early instrumental measurements versus colder reconstructed temperatures: shooting at a moving target. *Quat. Sci. Rev.* 26, 3298–3310 (2007).
26. Parker, D. E. Effects of changing exposure of thermometers at land stations. *Int. J. Climatol.* 14, 1–31 (1994).
27. Trewin, B. Exposure, instrumentation, and observing practice effects on land temperature measurements. *Wiley Interdiscip. Rev. Clim. Change* 1, 490–506 (2010).
28. Masson-Delmotte, V. P. et al. (eds) Climate change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the intergovernmental Panel on Climate Change (Cambridge Univ. Press, 2021).
29. Schneider, L. et al. Revising midlatitude summer temperatures back to AD 600 based on a wood density network. *Geophys. Res. Lett.* 42, 4556–4562 (2015).
30. Stoffel, M. et al. Estimates of volcanic-induced cooling in the Northern Hemisphere over the past 1,500 years. *Nat. Geosci.* 8, 784–788.
31. Wilson, R. J. S. et al. Last millennium Northern Hemisphere summer temperatures from tree rings. Part I: the long term context. *Quat. Sci. Rev.* 134, 1–18.
32. Guillet, S. et al. Climate response to the Samalas volcanic eruption in 1257 revealed by proxy records. *Nat. Geosci.* 10, 123–128 (2017).
33. Büntgen, U. et al. Prominent role of volcanism in Common Era climate variability and human history. *Dendrochronologia* 64, 125757 (2020).
34. Büntgen, U. et al. Cooling and societal change during the Late Antique Little Ice Age from 536 to around 660 AD. *Nat. Geosci.* 9, 231–236 (2016).
35. Esper, J. et al. (2018) Large-scale, millennial-length temperature reconstructions from tree-rings. *Dendrochronologia* 50, 81–90 (2018).
36. Esper, J. et al. European summer temperature response to annually dated volcanic eruptions over the past nine centuries. *Bull. Volcanol.* 75, 736 (2013).
37. Esper, J. et al. Northern Hemisphere temperature anomalies during the 1450s period of ambiguous volcanic forcing. *Bull. Volcanol.* 79, 41 (2017).
38. Esper, J. et al. Orbital forcing of tree-ring data. *Nat. Clim. Change* 2, 862–866 (2012).
39. Cai, W. et al. ENSO and greenhouse warming. *Nat. Clim. Change* 5, 849–859 (2015).
40. Columbia Climate School. ENSO forecast, <https://iri.columbia.edu/our-expertise/climate/forecasts/enso/current> (2024).
41. Kumar, A. & Hoerling, M. P. The nature and causes for the delayed atmospheric response to El Niño. *J. Clim.* 16, 1391–1403 (2003).
42. Bluth, G. J. et al. Global tracking of the SO₂ clouds from the June, 1991 Mount Pinatubo eruptions. *Geophys. Res. Lett.* 19, 151–154 (1992).
43. Parker, D. E. et al. The impact of Mount Pinatubo on world-wide temperatures. *Int. J. Climatol.* 16, 487–497 (1996).
44. Self, S. & Rampino, M. R. The 1963–1964 eruption of Agung volcano (Bali, Indonesia). *Bull. Volcanol.* 74, 1521–1536 (2012).
45. Francis, P. & Oppenheimer, C. *Volcanoes* (Oxford Univ. Press, 2004).
46. Medhaug, I., Stolpe, M. B., Fischer, E. M. & Knutti, R. Reconciling controversies about the ‘global warming hiatus’. *Nature* 545, 41–47 (2017).
47. Karl, T. R. et al. Possible artifacts of data biases in the recent global surface warming hiatus. *Science* 348, 1469–1472 (2015).
48. Stern, D. I. Reversal of the trend in global anthropogenic sulfur emissions. *Glob. Environ. Change* 16, 207–220 (2006).
49. Allan, R. P. IPCC, 2021: Summary for Policymakers. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the intergovernmental Panel on Climate Change (Cambridge Univ. Press, 2021).
50. Anchukaitis, K. J. & Smerdon, J. E. Progress and uncertainties in global and hemispheric temperature reconstructions of the Common Era. *Quat. Sci. Rev.* 286, 107537 (2022).