

AKADEMIE DER WISSENSCHAFTEN UND DER LITERATUR

Abhandlungen der
Mathematisch-naturwissenschaftlichen Klasse
Jahrgang 2022 • Nr. 1

Jan Esper

**Großräumige Temperaturrekonstruktionen
mit Baumringen**

AKADEMIE DER WISSENSCHAFTEN UND DER LITERATUR • MAINZ
FRANZ STEINER VERLAG • STUTTGART

Vorgetragen in der online abgehaltenen Akademiesitzung am 26. Februar 2021.
Zum Druck genehmigt am selben Tag, ausgegeben im Juni 2022.

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

ISBN: 978-3-515-13334-0 (Print)

ISBN: 978-3-515-13338-8 (E-Book)

© 2022 by Akademie der Wissenschaften und der Literatur, Mainz

Alle Rechte einschließlich des Rechts zur Vervielfältigung, zur Einspeisung in elektronische Systeme sowie der Übersetzung vorbehalten. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne ausdrückliche Genehmigung der Akademie und des Verlages unzulässig und strafbar.

Satz: Elena Hoch, Worms

Druck: Druckerei & Verlag Steinmeier GmbH & Co. KG, Deiningen

Gedruckt auf säurefreiem, chlorfrei gebleichtem Papier

Printed in Germany

Zusammenfassung

In den letzten zwei Jahrzehnten haben Dendrochronologen sechs jährlich aufgelöste Rekonstruktionen der Sommertemperatur für die nordhemisphärischen Außertropen erstellt. Hier vergleiche ich diese auf Baumringen basierenden Rekonstruktionen zurück bis in das Jahr 831 n. Chr. und diskutiere einige Charakteristika, um die Interpretation und Verwendung solcher Zeitreihen zu erleichtern. Dabei adressiere ich *(i)* das Ungleichgewicht zwischen vielen kurzen und nur wenigen langen Standortchronologien, die in die hemisphärischen Mittelwerte einfließen, *(ii)* die Bedeutung der maximaler Spätholzdichte für die neusten Rekonstruktionen, *(iii)* die Abnahme der Kovarianz zwischen einzelnen Standortchronologien vor 1400 n. Chr. und *(iv)* Unterschiede in den rekonstruierten Temperaturamplituden und langfristigen Trends der letzten 1100 Jahre. Während die großräumigen Rekonstruktionen in wesentlichen Punkten übereinstimmen, wie beispielsweise einem warmen Mittelalter und kühlen Temperaturen im 17. und 19. Jahrhundert, weisen sie im 13. und 14. Jahrhundert immer noch erhebliche Unterschiede auf. Schließlich rate ich davon ab, hemisphärische Rekonstruktionen durch einfache Mittelung zu kombinieren und ich gebe vier Empfehlungen, um die noch immer großen Unsicherheiten in diesen Zeitreihen mittelfristig zu verbessern.

Keywords: Jahrringbreite, Maximale Spätholzdichte, Mittelalterliche Warmzeit, Kleine Eiszeit, Nördliche Hemisphäre

1. Einleitung

Die anthropogenen Treibhausgase sind derzeit das dominante „Klimaforcing“ auf unserem Planeten. Allerdings bedeutet das nicht, dass natürliche Forcings wie Vulkanausbrüche und solare Variabilität keine Rolle mehr spielen. Die Rekonstruktion der natürlichen Klimavariabilität, während der Zeit vor dem Anthropozän (Crutzen, 2002), ist daher von entscheidender Bedeutung, um unser Verständnis der komplexen Wechselwirkungen des Klimasystems zu verbessern und Unsicherheiten bei der Vorhersage zukünftiger Klimaänderungen zu reduzieren. Diese Aussage ist weniger für die langen Zeiträume zutreffend, in denen mehrere Kilometer dicke Eisschilde entstanden und sich der Meeresspiegel um mehr als 100 m verändert hat (Liedtke, 1981; Rohling, 2017; Siddall et al., 2003). Viel wichtiger sind die letzten 1000 Jahre, in denen es zu anhaltenden Temperaturänderungen zwischen der Mittelalterlichen Warmphase (MWP) und der Kleinen Eiszeit („Little Ice Age“; LIA) kam (Lamb, 1972). Eine präzise Rekonstruktion dieser weitgehend natürlich verursachten Klimaschwankungen und ein besseres Verständnis der Amplitude der Temperaturvariabilität im kontinentalen bis hemisphärischen Maßstab, ist ein zentrales Forschungsziel aktueller Paläoklimaforschung (Luterbacher et al., 2016; Pages 2k Consortium, 2013).

Mittlerweile gibt es verschiedene Rekonstruktionen der Südhemisphäre (SH), Nordhemisphäre (NH) und globalen Durchschnittstemperaturen basierend auf Baumringen sowie der Kombinationen verschiedener Archive, sogenannte Multi-Proxy Rekonstruktionen (Übersichten in Christiansen und Ljungqvist, 2017; Frank et al., 2010; Jones et al., 2009; Smerdon und Pollack, 2016). Wichtige Multi-Proxy Temperaturrekonstruktionen wurden von Neukom et al. (2014) für die SH, Christiansen und Ljungqvist (2011), Christiansen und Ljungqvist (2012), Crowley und Lowery (2000), Hegerl et al. (2007), Juckes et al. (2007), Ljungqvist (2010), Mann et al. (1999), Moberget al. (2005), Shiet al. (2013) für die NH und Jones et al. (1998), Löhle (2007), Mann und Jones (2003), Mann et al. (2008) auf globaler Ebene erstellt. Die Integration mehrerer Archive ist jedoch eine Herausforderung, da nur Baumringe (und einige dokumentarische Aufzeichnungen aus Europa und Asien; Qian et al., 2003; van Engelen et al., 2001) eine genaue jährliche Datierungskontrolle (Büntgen et al., 2018) über das gesamte vergangene Jahrtausend ermöglichen und rigoros an instrumentelle Temperaturdaten kalibriert und verifiziert werden können (Cook et al., 1994). Großräumige Temperaturrekonstruktionen, die ausschließlich mit Baumringen erstellt wurden,

umfassen Arbeiten von Briffa (2000), Esper et al. (2002), D'Arrigo et al. (2006), Schneider et al. (2015), Stoffel et al. (2015) und Wilson et al. (2016), die alle die NH Außertropen abdecken (Tabelle 1). Eine weitere, kürzlich veröffentlichte NH Rekonstruktion nur aus Baumringen fehlt hier (Xing et al., 2016), da diese Zeitreihe nicht jährlich aufgelöst ist. Die Darstellung von SH Temperaturen ist im Allgemeinen aufgrund der geringen Landmassen und der begrenzten Anzahl von terrestrischen Archiven schwieriger (Neukom und Gergis, 2012). Derzeit sind nur vier baumringbasierte lokale Temperaturrekonstruktionen für das vergangene Jahrtausend aus der SH verfügbar (Esper et al., 2016), was die Entwicklung von rein jahring-basierter Rekonstruktionen für diese Hemisphäre ausschließt.

Der erste Versuch, lokale Standortchronologien zu kombinieren, um die Temperaturen des letzten Jahrtausends in großen räumlichen Maßstäben darzustellen, wurde vor 20 Jahren durchgeführt, als Keith Briffa sieben Chronologie der Jahringbreite („tree-ring width“, TRW) und zwei der maximalen Spätholzdichte (MXD) von Standorten in den hohen Breiten Eurasiens und Nordamerikas zusammengefasst hat (Briffa, 2000; Bri00) (Tabelle 1). Die Mittelkurve dieses Netzwerks wurde später mit instrumentellen Jahresmitteltemperaturen von 1881–1960 kalibriert (Briffa und Osborn, 2002) und in verschiedenen Veröffentlichungen und IPCC Berichten dargestellt. Diese Studie wurde anschließend durch die Entwicklung eines größeren Netzwerks weitergeführt, das 14 TRW Standortchronologien integriert (Esper et al., 2002; Esp02) und in dem die Autoren – als Reaktion auf die relativ flache „Hockeyschläger“ Multi-Proxy-Rekonstruktion (Mann et al., 1999) – langfristige Temperaturtrends betonen. Die Varianz der Esp02 Rekonstruktion wurde später noch korrigiert und in Jahresmitteltemperaturen der Landflächen zwischen 20–90 °N transferiert (Frank et al., 2007b). Ein weiterer Meilenstein war die Entwicklung einer 20–90 °N Temperaturrekonstruktion, die bis 747 n. Chr. zurückreicht und viele weitere, auch kürzere, TRW Chronologien integriert, mit dem Ziel, den räumlichen Bereich der NH Extratropen bestmöglich darzustellen (D'Arrigo et al., 2006; DAr06). DAr06 identifizierte auch einen Versatz („divergence“) zwischen den steil ansteigenden Temperaturen im späten 20. Jahrhundert und den Baumringchronologien. Etwa zehn Jahre später wurden drei neue Rekonstruktionen der außertropischen NH Temperaturen veröffentlicht, darunter eine rein MXD-basierte Zeitreihe von Schneider et al. (2015; Sch15) und zwei Zeitreihen, die deutlich mehr Standortchronologien kombinieren (Stoffel et al., 2015; Wilson et al., 2016; Sto15 bzw. Wil16). Während Sch15 und Wil16 darauf abzielten, die Temperaturvariabilität auf allen Zeitskalen zu reproduzieren, wurde

Rekonstruktion	Akronym	Zielsetzung	Netzwerk	Kommentar
Briffa 2000 (QSR)	Bri00	Erste Darstellung der NH-Sommertemperaturen des vergangenen Jahrtausends in hohen Breiten	Begrenzte Anzahl an Standortchronologien von 45-72°N	Netzwerkmittelwert nicht kalibriert gegen instrumentelle Temperaturen
Esper et al. 2002 (Science)	Esp02	Niederfrequente Trends bei der Rekonstruktion der extratropischen NH-Temperaturen	Inklusive Standort-chronologien mit schwachen Temperatursignalen	Varianzstabilisiert und kalibriert in Frank et al. (2007)
D'Arrigo et al. 2006 (JGR)	DAR06	Darstellung der NH-Extratropen unter Verwendung der am besten kalibrierenden Standortchronologien	Enthält viele kürzere Chronologien, die die letzten Jahrhunderte abdecken	Divergenz zwischen Baumringen und Temperaturen festgestellt
Schneider et al. 2015 (GRL)	Sch15	Rekonstruktion hochfrequenter postvulkanischer Abkühlungssignale	Kombiniert nur lange MXD-Chronologien	14. Jahrhundert wärmer als in jeder anderen Rekonstruktion
Stoffel et al. 2015 (NatGeo)	Sto15	Darstellung der NH-Extratropen einschließlich postvulkanischer Abkühlungssignale	Enthält viele neue TRW- und MXD-Chronologien	Zeigt eine stärkere postvulkanische Abkühlung als andere Rekonstruktionen
Wilson et al. 2016 (QSR)	Wil16	Verbesserte Darstellung der NH-Extratropen unter Verwendung von Standortchronologien mit der besten Kalibrierung	Neue Chronologien plus PCA Gitterpunkt-“Chronologien“ aus Asien	Räumliche Rekonstruktion in Anchukaitis et al. (2017)

Tabelle 1: Großräumige jahrringbasierte Temperaturrekonstruktionen.

Sto15 für die Analyse kurzfristiger Abkühlungsmuster in der Folge von großen vulkanischen Eruptionen entwickelt.

In diesem Beitrag bespreche ich diese sechs Temperaturrekonstruktionen aus Baumringen (Tabelle 1), um ihre Verwendung durch KollegInnen anderer Disziplinen zu erleichtern. Ich konzentriere mich dabei auf die Mittelwertkurven, die entsprechend in anderen Arbeiten wiederverwendet werden, verweise jedoch auch auf die Bedeutung räumlich differenzierter Rekonstruktionen (Anchukaitis et al., 2017; Guillet et al., 2017) für zahlreiche Fragestellungen, einschließlich Proxy-Modell Vergleichen (Bothe et al., 2015; Fernández-Donado et al., 2013; Hartl-Meier et al., 2017; Ljungqvist et al., 2016). Insbesondere fokussiere ich auf die den Rekonstruktionen zugrunde liegenden Jahrringserien (Replikation), bespreche die Klimasignale und die Kovarianz der Rekonstruktionen und vergleiche die rekonstruierten Temperaturverläufe seit 831 n. Chr. Ich leite schließlich vier Empfehlungen ab, deren Realisation zu einem besseren Verständnis der vorinstrumentellen Temperaturen auf der regionalen bis hemisphärischen Maßstabebene führen können.

2. Die Anzahl inkludierter Jahrringserien (Replikation)

Obwohl die sechs großräumigen Temperaturrekonstruktionen unterschiedliche Jahrringnetzwerke integrieren, teilen sie einige der gleichen Daten. Die älteren Rekonstruktionen (Bri00, Esp02) verwendeten kleinere Netzwerke, hauptsächlich weil damals weniger Jahrringchronologien verfügbar waren und die Autoren sich stärker auf die Berücksichtigung nur langer Chronologien konzentrierten. Eine Ausnahme davon bildet Sch15, wo lediglich eine begrenzte Anzahl langer MXD Chronologien kombiniert wurde. Neben der Tendenz hin zu größeren Jahrringnetzwerken in Sto15 und Wil16, wurden einige Standorte bei allen Rekonstruktionen verwendet. Ein Paradebeispiel ist die Torneträsk MXD Chronologie aus Nordschweden, die ursprünglich 1988 veröffentlicht (Schweingruber et al., 1988) und danach aktualisiert und geändert wurde (Grudd, 2008; Melvin et al., 2013). Die neueren Torneträsk Versionen integrieren mehr Dichtedaten, obwohl der Kern der MXD Serien aus Reliktmaterial gleichblieb (Esper et al., 2014). Solche allmählichen Änderungen und Verbesserungen einzelner Standortchronologien und die Integration verschiedener Versionen dieser lokalen Zeitreihen erschweren den Vergleich von Replikationsänderungen zwischen den hemisphärischen

Rekonstruktionen. Außerdem ist auf der hemisphärischen Ebene eine genaue Unterscheidung zwischen der Anzahl der Messreihen und der Anzahl der Bäume nicht möglich. Dies liegt daran, dass die Praktiken der Beprobung von Bäumen (z. B. ein oder mehrere Bohrkerne pro Baum) und die Verarbeitung (z. B. Berechnung von Baummittelkurven oder Verwendung einzelner Radian) zwischen den Forschungsgruppen variieren und häufig unvollständig dokumentiert sind, insbesondere bei den Datensätzen aus den 1970er–1990er Jahren.

Besprechung der Replikation von Rekonstruktionen müssen wir zwischen drei Ebenen der Datenaggregation unterscheiden: „Standortchronologien“, „regionale Cluster“ und „Gitterpunkt-Chronologien“ (Abb. 1). Eine Standortchronologie ist die Mittelkurve verschiedener Messreihen (MXD oder TRW) von Bäumen einer ökologischen Einheit, wie dem Gebiet um den See Torneträsk in Nordschweden. Standortchronologien sind die klassische Größe, die in Bri00 (#9 Chronologien), Esp02 (#14) und Sch15 (#15) verwendet und kombiniert wurden. Regionale Cluster stellen die Kombination mehrerer Standortchronologien unterschiedlicher Länge aus einem größeren Gebiet dar, wie z. B. den europäischen Alpen (mit #10 Standortchronologien) oder dem nordwestlichen Alaska (#4) in DAr06. Cluster Mittelwertkurven wurden von DAr06 (#19 Cluster) eingeführt und von Sto15(#30) und Wil16 (#54; Abb. 1b) verwendet. Sie bilden auch die Grundlage für die Kalibration mit instrumentellen Daten und Berechnung der erklärten Varianzen der instrumentellen Temperaturvariabilität (r^2), eine Größe, die für die längeren Cluster, wenn weniger Daten zur Verfügung stehen, in der Regel abnimmt (Abb. 1c). Die Anzahl der zugrunde liegenden TRW und MXD Messreihen ist offensichtlich in den Cluster-Mittelkurven viel größer als in den einzelnen Chronologien, aber in beiden Fällen ist noch immer ersichtlich, welche spezifischen Standorte in einem bestimmten Cluster enthalten sind. Diese Information ist bei Gitterpunkt-Chronologien, wie sie zusätzlich in Wil16 in Zentral- und Ostasien verwendet wurden, nicht mehr verfügbar (Cook et al., 2013). Die Verwendung dieser zusätzlichen Datenpunkte ermöglichte somit zwar die Berücksichtigung eines ansonsten unterrepräsentierten Raums in Wil16, allerdings geschah dies auf Kosten der Darstellbarkeit der zugrunde liegenden Messreihen.

Unter Berücksichtigung dieser Einschränkungen habe ich die Replikation eines jeden Netzwerks (mit Ausnahme von Wil16) kalkuliert, mit der Einschränkung, das nicht zwischen Bäumen und Radian unterschieden werden kann (Abb. 1d). Demnach hat die Anzahl der in die großräumigen Rekonstruktionen integrierten Bäume seit den frühen Arbeiten (Bri00) erheblich zugenommen. Die 19 regionalen Clu-

Großräumige Temperaturrekonstruktionen mit Baumringen

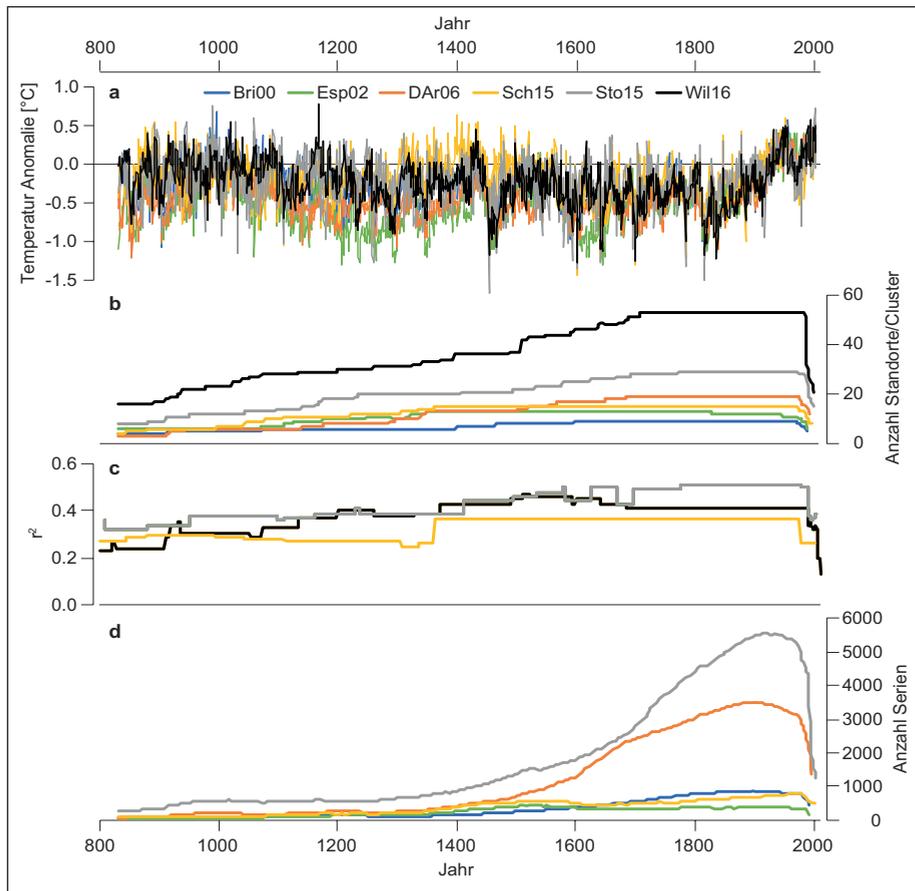


Abbildung 1: Tausendjährige Temperaturrekonstruktionen mit Baumringen. **a**, Sechs Temperaturrekonstruktionen in der warmen Jahreszeit (großer Teile) der Nordhemisphäre zurück bis 831 n. Chr. Alle Rekonstruktionen an 30–70°N JJA-Temperaturen von 1881–1992 skaliert und als Anomalien vom Mittelwert von 1961–1990 dargestellt. **b**, Die zeitlich wechselnde Veränderung der integrierten Standortchronologien in Bri00, Esp02 und Sch15, sowie der regionalen Clustern in DAr06, Sto15 und Wil16. **c**, r^2 Statistiken der unterschiedlich replizierten Nester der kürzlich veröffentlichten Sch15, Sto15 und Wil16 Rekonstruktionen. **d**, Die zeitliche Veränderung der in den Rekonstruktionen integrierten Messreihen (Bäume oder Radien) (Daten für Wil16 nicht reproduzierbar).

ster in D'Ar06 bestehen aus 66 Standortchronologien und >3400 Serien (Bäume oder Radien) im späten 19. Jahrhundert. Die 30 Cluster in Sto15 inkludieren 233 Standortchronologien und >5500 Serien im frühen 20. Jahrhundert. Im Vergleich dazu integrieren die alten Bri00 und Esp02 Netzwerke, aber auch das reine Sch15 MXD-Netzwerk viel weniger Serien und überschreiten 900 zu keinem Zeitpunkt des letzten Jahrtausends. Die Replikation in diesen kleineren Netzwerken geht im 11. Jahrhundert auf nur 132 Serien in Sch15, 74 Serien in Esp02 und 119 Serien in Bri00 zurück, was die Fähigkeit zur Rekonstruktion großräumiger Temperaturen während des Mittelalters im Vergleich zur Kalibrierungsperiode des 20. Jahrhunderts erheblich einschränkt. Die Replikation im 11. Jahrhundert ist in DAr06 (187 Serien) und insbesondere Sto15 (569 Serien) zwar höher, allerdings bleibt das starke Ungleichgewicht zwischen wenigen Serien zu Beginn des Jahrtausends und vielen Serien im 20. Jahrhundert bestehen. Diese Situation ist in Wil16 ähnlich mit lediglich noch mehr Jahrringserien vor allem in den rezenten Abschnitten.

3. Kalibration an instrumentellen Daten (Signalstärke)

Alle Rekonstruktionen wurden an instrumentelle Juni–August (JJA) Mitteltemperaturen, die über Landflächen von 30–70 °N gemittelt wurden (Harris et al., 2014), kalibriert. Dabei ist zu berücksichtigen, dass sich die Ergebnisse leicht ändern, wenn eine längere Saison (z. B. Mai–September) oder ein anderer Raum (z. B. 30–80 °N) betrachtet würden. Die Verwendung von Jahresmitteltemperaturen, wie sie in den frühen Arbeiten berücksichtigt wurden (Bri00, Esp02, DAr06), ist nicht ratsam, da die Bäume vor allem auf die Temperaturen während der Vegetationsphase reagieren. Berücksichtigt werden hier Pearson Korrelationen über den gemeinsamen Zeitraum der Überschneidung zwischen Proxy- und Instrumentendaten von 1881–1992, sowie über einen früheren (1881–1936) und späteren (1937–1992) Kalibrierungszeitraum unter Verwendung der Original-, Hochpass- und Tiefpass-gefilterte Daten (Abb. 2). Instrumentelle Daten vor 1881 werden hier nicht berücksichtigt, da die frühen Aufzeichnungen durch direkte und reflektierte Strahlung beeinflusst sind (Böhm et al., 2001, 2010; Frank et al., 2007a; Parker, 1994).

Die auf Baumringen basierenden Rekonstruktionen kalibrieren unterschiedlich gegen instrumentelle Temperaturen, wobei die neueren Zeitreihen (Sch15, Sto15, Wil16) insbesondere im Hochfrequenzbereich und in der zweiten Hälfte

Großräumige Temperaturrekonstruktionen mit Baumringen

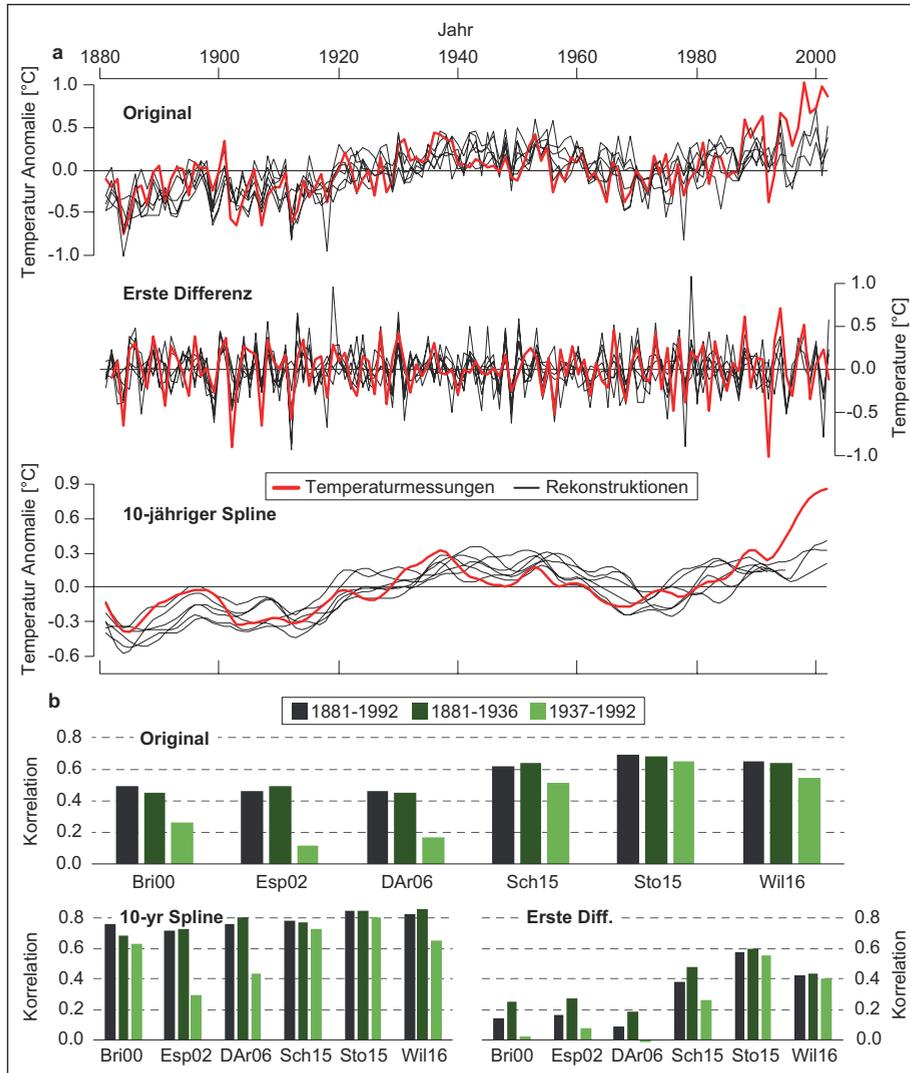


Abbildung 2: Kalibration. **a**, Sechs großräumige Temperaturrekonstruktionen (schwarz) skaliert an instrumentelle 30–70°N Land JJA-Temperaturen von 1881–1992 (rot). Dargestellt sind die ursprüngliche Zeitreihe (oben), hochpassgefilterte Zeitreihe (Mitte) und die tiefpassgefilterte Zeitreihe (unten). Bri00 und Esp02 enden 1992, DAr06 1995 und Sch15, Sto15 und Wil16 2002. **b**, Korrelation zwischen den Rekonstruktionen und instrumentellen JJA-Temperaturen über den vollen (1881–1992; dunkelgrün), frühen (1881–1936; grün) und späten (1937–1992; hellgrün) Kalibrierungszeitraum.

des 20. Jahrhunderts wesentlich besser abschneiden. Während diese Rekonstruktionen alle $r > 0,62$ mit Sommertemperaturen (1881–1992) korrelieren, übersteigt keine der älteren Rekonstruktionen $r = 0,49$ (Bri00, Esp02, DAr06). Dieser Unterschied ist in der jüngsten Kalibrierungsperiode von 1937–1992 noch auffälliger. Die älteren Rekonstruktionen erklären hier weniger als 7% der Temperaturvarianz ($r = 0,26$; Minimum in Esp02 = 0,12), was einen erheblichen Verlust der Signalstärke während des 20. Jahrhunderts bedeutet. Diese Signalverschlechterung ist in Sch15, Sto15 und Wil16 deutlich abgeschwächt, wenn nicht sogar überwunden (Abb. 2a). Die Divergenz zwischen Rekonstruktionen und instrumentellen Temperaturen nach 1990 fällt mit einem Rückgang der Replikation in allen Rekonstruktionen zusammen, was sich auch in den r^2 Statistiken von Sch15, Sto15 und Wil16 widerspiegelt (Abb. 1b-d).

Alle sechs Rekonstruktionen korrelieren gut mit den geglätteten Instrumentendaten ($r_{1881-1992} = 0,71-0,84$), was die Fähigkeit von Baumringdaten zeigt, niederfrequente sommerliche Temperaturschwankungen aufzuzeichnen (Abb. 2b). Dieses Signal scheint zwischen den frühen und späten Kalibrierungsperioden ziemlich robust zu sein, mit Ausnahme von DAr06 und Esp02, bei denen die Korrelationen zwischen 1937 und 1992 auf $r = 0,44$ bzw. 0,29 abfallen. Bei den hochpassgefilterten Daten ist die Situation jedoch völlig anders. Hier korrelieren nur die kürzlich veröffentlichten Sch15, Sto15 und Wil16 Rekonstruktionen signifikant ($r_{1881-1992} = 0,38-0,58$), während die frühen Bri00, Esp02 und DAr06 Rekonstruktionen alle mit $r < 0,17$ korrelieren. Die insgesamt überlegene Kalibrierung der kürzlich veröffentlichten Rekonstruktionen und insbesondere ihre verbesserte Korrelation im Hochfrequenzbereich sind das Ergebnis (*i*) der besser replizierten Chronologie-Netzwerke und (*ii*) der Verwendung von mehr MXD Chronologien. Letztere kalibrieren typischerweise besser gegen instrumentelle Temperaturen (im Vergleich zu TRW) und sind weniger durch biologische Memory-Effekte beeinflusst (Büntgen et al., 2015; Briffa et al., 1998; Esper et al., 2015; Frank und Esper, 2005). Während alle hochpassgefilterten Rekonstruktionen in der Periode 1937–1992 schwächer korrelieren, verlieren die älteren Bri00, Esp02 und DAr06 Rekonstruktionen dieses Signal vollständig, was bekräftigt, dass diese frühen Arbeiten nicht für die Bewertung der Jahr-zu-Jahr Variabilität verwendet werden sollten (Anchukaitis et al., 2012).

Das Integration weiterer MXD Chronologien in den neuesten Baumringnetzwerken reduziert auch die Autokorrelationen in Wil16 ($r_{\text{lag-1}} = 0,61$), Sch15 (0,46) und insbesondere Sto15 (0,23) im Vergleich zu den früheren Rekonstruktionen

Großräumige Temperaturrekonstruktionen mit Baumringen

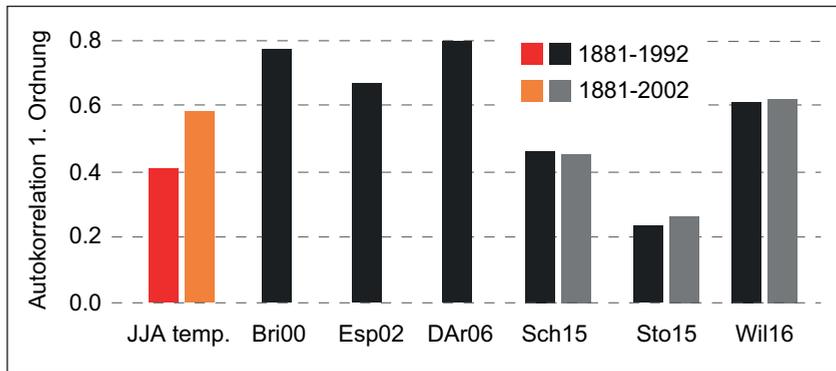


Abbildung 3: Autokorrelationen erster Ordnung der 30–70°N mittleren JJA-Landtemperaturen und großräumigen Rekonstruktionen von 1881–1992 (rot und schwarz) und 1881–2002 (orange und grau).

($r_{\text{lag-1}} = 0,67\text{--}0,80$), wenn man den instrumentellen Zeitraum von 1881–1992 berücksichtigt (Abb. 3). Während die älteren Rekonstruktionen die Autokorrelation der instrumentellen Daten überschätzen, stimmt die rein MXD-basierte Sch15 Rekonstruktion hier ziemlich gut mit den großräumigen (30–70 °N) Temperaturaufzeichnung überein. Die Autokorrelation der instrumentellen Aufzeichnung nimmt erheblich zu (von 0,41 auf 0,59), wenn ein längerer Zeitraum von 1881 bis 2002 berücksichtigt wird (orangefarbener Balken in Abb. 3). Diese Änderung wird größtenteils durch den rasanten Anstieg der Sommertemperaturen seit dem späten 20. Jahrhundert verursacht (Abb. 2a), was zu einer engeren Übereinstimmung zwischen der Temperatur- und den Wil16-Autokorrelationen im Zeitraum 1881–2002 führt. Die Sto15 Rekonstruktion hingegen unterschreitet die Autokorrelation der instrumentellen Daten, was möglicherweise auf eine Überschätzung der Varianz im Hochfrequenzbereich in dieser Zeitreihe hinweist.

4. Varianz und Kovarianz der Rekonstruktionen

Die Berechnung der gleitenden Standardabweichungen hebt die Perioden sich ändernder rekonstruierter Temperaturvarianzen über das vergangene Jahrtausend hervor (Abb. 4). Es hat sich gezeigt, dass Perioden mit erhöhter Varianz mit starken post-vulkanischen Abkühlungsereignissen zusammenfallen (Hartl-Meier

et al., 2017). Die sechs hier ausgewerteten Rekonstruktionen zeigen erhebliche Standardabweichungsänderungen von $0,14^{\circ}\text{C}$ zwischen 1303 und 1402 in DAr06 bis $0,38^{\circ}\text{C}$ zwischen 1535 und 1634 in Esp02 (die orangen und grünen Kurven in Abb. 4a). Seit dem 13. Jahrhundert zeichnen sich die Rekonstruktionen durch gleichzeitige Veränderungen zwischen reduzierten und erhöhten Varianzen aus. Vor 1400 sind Varianzänderungen weniger ausgeprägt und zwischen den Rekonstruktionen nicht synchronisiert.

Während des 15. Jahrhunderts wurden deutliche Varianzzunahmen rekonstruiert, die mit einer starken Abkühlung nach einem Vulkanausbruch im Jahre 1452 zusammenfallen (Esper et al., 2017). Ähnlich ist die Situation über einen längeren Zeitraum vom frühen 17. bis zum frühen 19. Jahrhundert inklusive dem Dalton Minimum und dem Tambora Ausbruch von 1815 (Oppenheimer, 2003; Raible et al., 2016; Stothers, 1984). Diese Wechsel von Perioden mit reduzierter und erhöhter Varianz sind vor allem zwischen den kürzlich veröffentlichten Sch15, Sto15 und Wil16 Rekonstruktionen kohärent (Abb. 4a) die von 1401–1992 mit $r = 0,53$ ($p < 0,1$) korrelieren. Vor 1400 aber fällt diese Kovarianz auf $r_{831-1400} = 0,06$ zusammen. Die schwächere Synchronisation zwischen den aktuellen Rekonstruktionen vor 1400 deuten darauf hin, dass entweder weniger Vulkanausbrüche großräumige Abkühlungen hervorgerufen haben (obwohl der Samalas-Ausbruch im Jahr 1257 und andere große Eruptionen berichtet wurden; Guillet et al., 2017; Lavigne et al., 2013; Vidal et al., 2017) und/oder eine Schwächung der Signalstärke der großräumigen Rekonstruktionen vorliegt (siehe Goosse (2017) und Phipps et al. (2013) für Vergleiche mit Klimamodellen). Letzteres könnte mit der stark reduzierten Replikation zusammenhängen, die die Fähigkeit der Baumringnetzwerke einschränkt, großräumige synchrone Temperaturabweichungen abzubilden.

Betrachtet man die hochpassgefilterten Rekonstruktionen (Abb. 4b), so fallen zwei weitere Merkmale auf: (i) ein Versatz zwischen mehr und weniger variablen Rekonstruktionen und (ii) ein zeitlicher Varianzdrift in den älteren Rekonstruktionen Bri00 und DAr06. Letzteres steht wiederum mit dem Rückgang der Probenreplikation und (in geringerem Maße) dem Anstieg der Kovarianz in Zusammenhang (Osborn et al., 1997). Diese zeitliche Veränderung war ursprünglich in allen frühen Rekonstruktionen (Bri00, DAr06, Esp02) enthalten, wurde jedoch in einer Nachfolgepublikation für Esp02 angepasst (Frank et al., 2007b). Die hochpassgefilterten Rekonstruktionen zeigen auch dauerhafte Varianz-Offsets mit unterschiedlichen Standardabweichungen von $0,17^{\circ}\text{C}$ in DAr06 bis $0,36^{\circ}\text{C}$

Großräumige Temperaturrekonstruktionen mit Baumringen

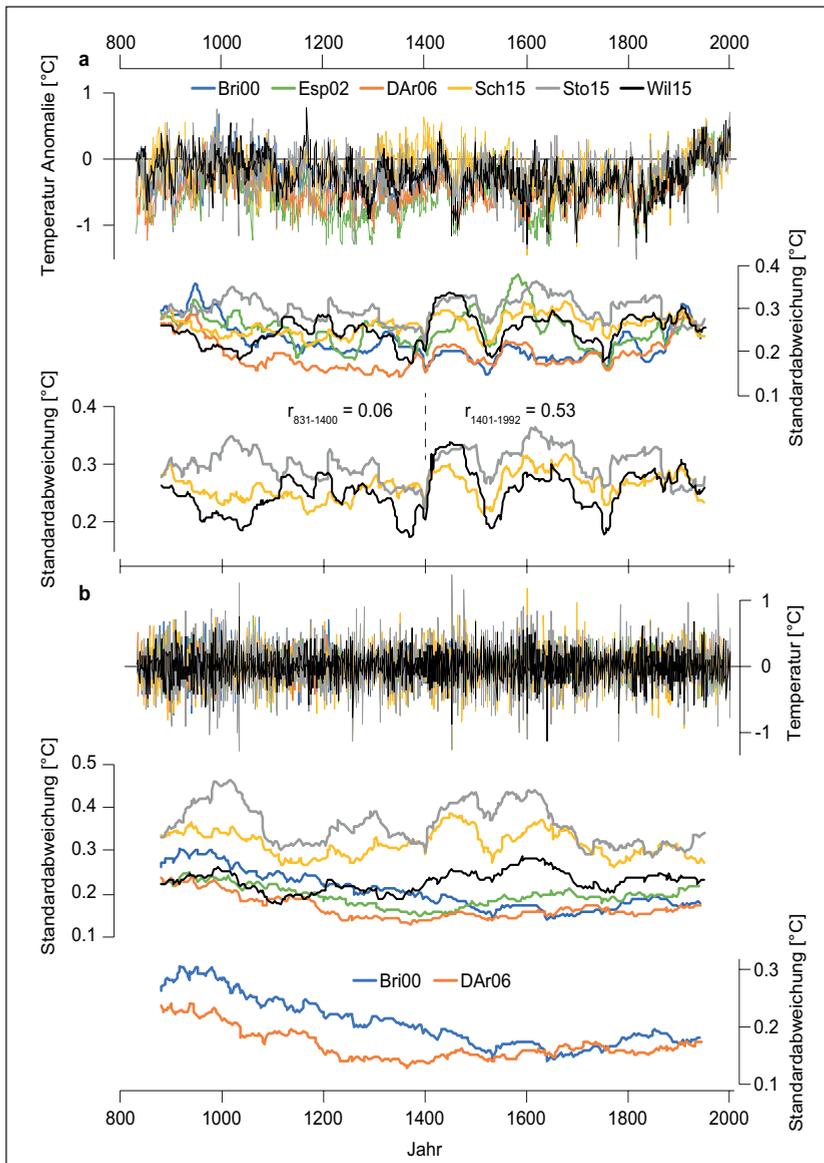


Abbildung 4: Varianz rekonstruierte Temperaturen. **a**, Temperaturrekonstruktionen (oben) und 100-jährige Standardabweichungskurven (Mitte). Die Kurven darunter zeigen ausschließlich die laufenden Standardabweichungen der kürzlich veröffentlichten Sch15, Sto15 und Wil16 Rekonstruktionen. **b**, Entsprechend a, aber für die hochpassgefilterten Rekonstruktionen. Unten sind die Standardabweichungskurven der Bri00 und DAr06 Rekonstruktionen dargestellt.

in Sto15 (Abb. 4b). Die Temperaturvariabilität in Sch15 und Sto15 übersteigt deutlich die Varianz aller anderen Rekonstruktionen, was wahrscheinlich mit der Verwendung von MXD Daten und der Betonung des hochfrequenten Signals zur Evaluierung post-vulkanischer Abkühlungsereignisse in Sto15 zusammenhängt.

Die hier dargestellten Temperaturabweichungen beziehen sich auf den Zeitraum von 1881–1992, den Landflächen zwischen 30–70 °N, sowie JJA Mitteltemperaturen. Die Werte würden sich ändern, wenn eine andere Jahreszeit (z. B. Jahresmitteltemperaturen), Raum (z.B. 40–90°N), instrumentelle Daten (z. B. BEST anstatt CRU-Temperaturen; Harris et al., 2014; Rohde et al., 2013) oder Methode (z. B. Regression anstatt Skalierung; Esper et al., 2005) verwendet werden, wie dies auch in den Originalpublikationen der Fall ist. Um jedoch einen direkten Vergleich zu gewährleisten, müssen die Rekonstruktionen einheitlich skaliert bzw. regressiert werden (Harris et al., 2014).

Die durchschnittlichen Korrelationen zwischen den einzelnen hemisphärischen Temperaturrekonstruktionen und allen anderen (Zeitraum 831–1992) reichen von $r = 0,49$ (Sch15) bis $r = 0,59$ (DAR06) (Abb. 5). Dieser Zusammenhang schrumpft auf $r_{\text{HighPass}} = 0,35\text{--}0,45$, wenn man die hochpassgefilterten Zeitreihen berücksichtigt, und steigt auf $r_{10\text{Jahre}} = 0,54\text{--}0,68$ und $r_{30\text{Jahre}} = 0,55\text{--}0,71$ nach Betonung der gemeinsamen dekadischen bis multi-dekadischen Varianz durch Glättung der Rekonstruktionen. Die zeitliche Veränderung dieser Zusammenhänge kommt durch eine Korrelationsabnahme von $r = 0,35\text{--}0,49$ für die Zeit vor 1400 n. Chr. auf $r = 0,60\text{--}0,74$ für die Zeit nach vor 1400 n. Chr. zum Ausdruck (Abb. 5 unten).

Diese zeitliche Veränderung zeigt sich auch in den 100-jährigen gleitenden Korrelationen, die über das letzte Jahrtausend berechnet wurden (Abb. 6). Auch hier erhöhen große Vulkanausbrüche, wie die Eruption von 1452, die Kovarianz, aber das auffälligste Merkmal ist der Rückgang der Kovarianz von $r = 0,59$ nach 1400 auf $r = 0,17$ vor 1400 n. Chr. Dieser Rückgang bedeutet gleichsam eine Schwächung der Rekonstruktionspotentials verursacht durch die schrumpfende Probenreplikationen (violette Kurve in Abb. 6a). Der Kovarianz-Abfall ist zwischen bestimmten Rekonstruktionspaaren ausgeprägter (z. B. Bri00-Esp02, Sto15-Wil16), während andere Kombinationen weniger betroffen zu sein scheinen (Abb. 6b-c). Insbesondere Sch15–Sto15 korrelieren während des letzten Jahrtausends anhaltend gut, was auf die gemeinsame Verwendung (derselben) MXD Daten zurückzuführen ist. Das Bri00-DAR06 Paar korreliert besonders stark nach der Hochpassfilterung (Abb. 6c).

Großräumige Temperaturrekonstruktionen mit Baumringen

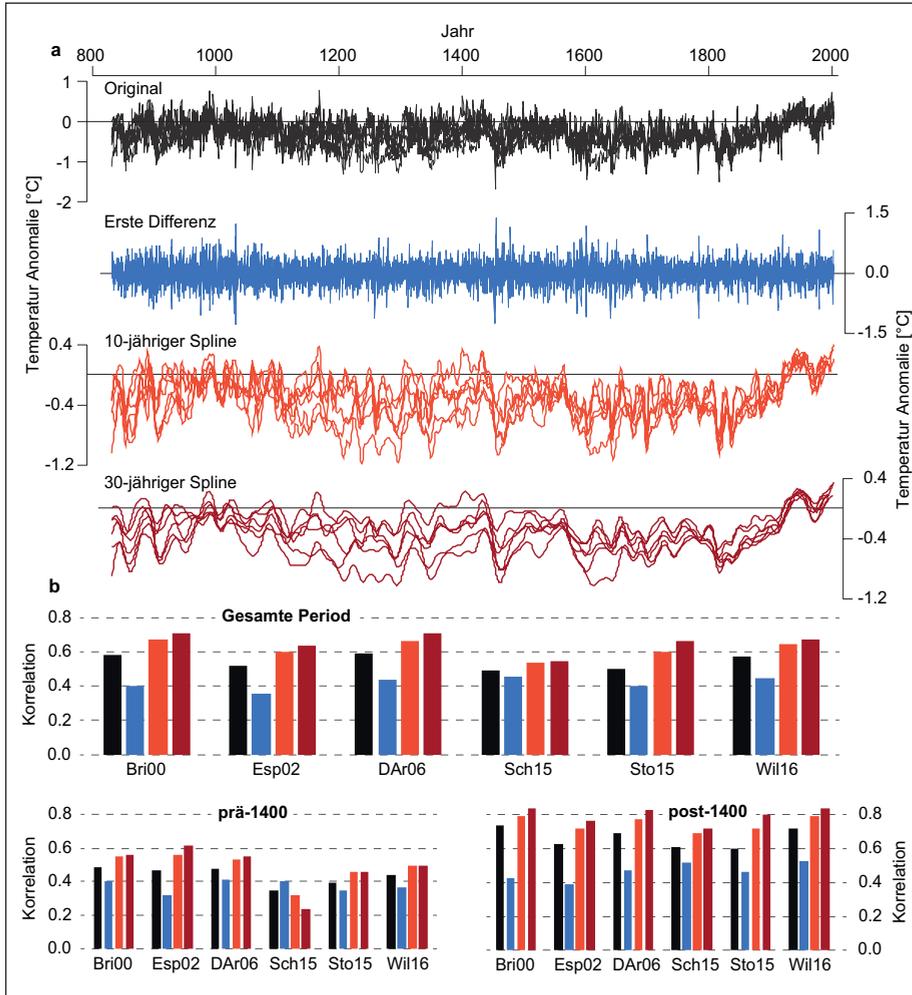


Abbildung 5: Kovarianz der Rekonstruktionen. **a**, Sechs großräumige Rekonstruktionen skaliert an 30-70°N JJA-Temperaturen von 1881–1992 (schwarze Kurven) und nach zusätzlicher Hochpassfilterung (blau), 10-jähriger Tiefpassfilterung (rot) und 30-jähriger Tiefpassfilterung (dunkelrot). **b**, Durchschnittliche Korrelation jeder Rekonstruktion mit den fünf anderen Rekonstruktionen unter Verwendung der original (schwarz), hochpassgefilterten (blau), 10-jährigen geglätteten (rot) und 30-jährigen geglätteten Daten (dunkelrot). Dargestellt sind die Resultate für den gesamten Zeitraum von 1000–1992 (oben), den Zeitraum vor 1400 (links) und den Zeitraum nach 1400 (rechts).

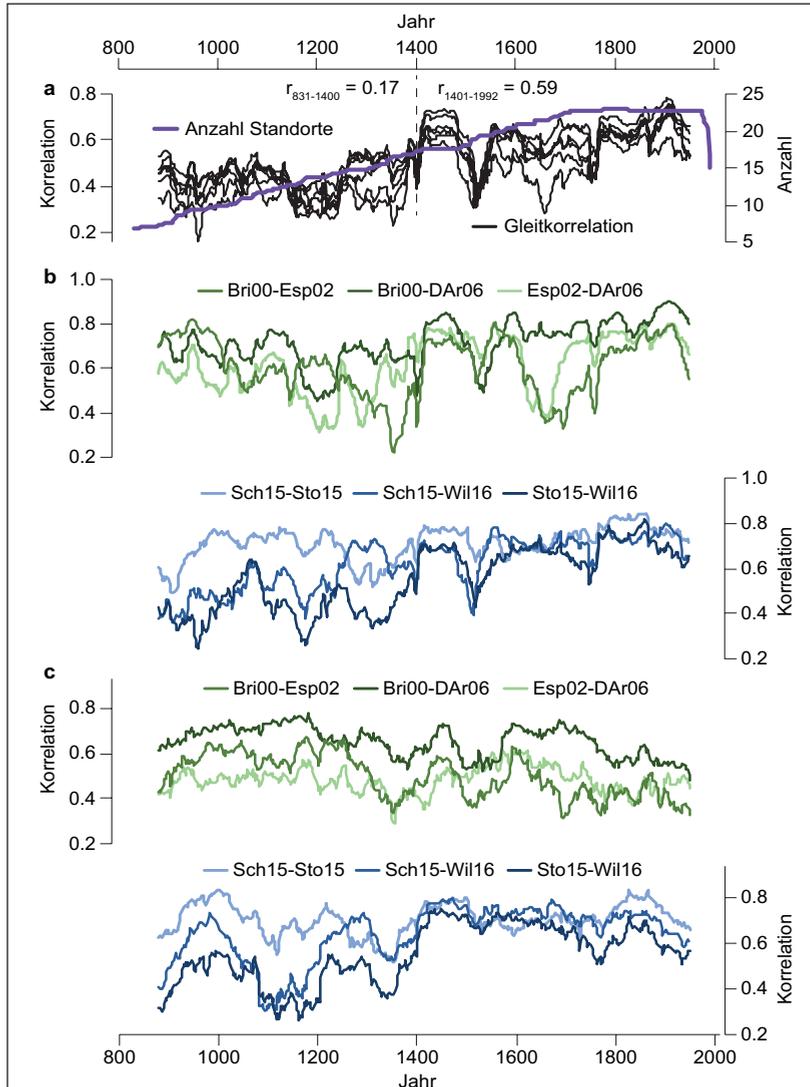


Abbildung 6: Zeitliche Veränderungen der Kovarianz. **a**, 100-jährige gleitende Korrelationen zwischen den großräumigen Temperaturrekonstruktionen. Jede schwarze Kurve stellt den Mittelwert dar, der sich aus der Korrelation eines Datensatzes mit den fünf anderen ergibt. Die violette Kurve zeigt die durchschnittliche Anzahl von Standortchronologien (oder Clustern), die in den Rekonstruktionen zwischen 831–1992 verwendet wurden. **b**, Gleitende Korrelationen zwischen den älteren Rekonstruktionen (Bri00, Esp02, DAr06) in grün und zwischen den kürzlich veröffentlichten Rekonstruktionen (Sch15, Sto15, Wil16) in blau. **c**, Entsprechend **b**, aber für die hochpassgefilterten Zeitreihen.

5. Temperaturen des letzten Jahrtausends

Obwohl die hemisphärischen Temperaturrekonstruktionen insbesondere nach 1400 n. Chr. sehr ähnlich sind, bestehen auch Unterschiede in den einzelnen Temperaturverläufen (Abb. 7). Während in allen Rekonstruktionen das 20. Jahrhundert als das wärmste in den letzten 1100 Jahren erscheint, sind die kältesten Jahrhunderte unterschiedlich (1 x 13. Jhd., 3 x 17 Jhd., 2 x 19. Jhd.). Zu den wärmsten vorinstrumentellen Jahrhunderten zählen das 10. (1x), das 11. (3x), das 14. (1x) und das 16. (1x). Wenn man sich auf die kürzlich veröffentlichten und gut replizierten Rekonstruktionen konzentriert, sind die Ergebnisse in Bezug auf die kältesten Jahrhunderte (17. und 19. Jhd.) kohärenter, aber es bleiben erhebliche Unterschiede zwischen den wärmsten Jahrhunderten. Insbesondere das von Sch15 rekonstruierte warme 14. Jahrhundert bietet eine neue Perspektive auf die vorinstrumentelle Klimavariabilität, die sich so in keiner anderen Rekonstruktion widerspiegelt. In Sch15 erscheint der Übergang von der MWP in die LIA erheblich verzögert und die LIA zeitlich auf das 17. bis 19. Jahrhundert beschränkt.

Die Temperaturamplitude zwischen den kältesten und wärmsten Jahrhunderten ist in Esp02 am größten ($\Delta T_{\text{Jhd}} = 0,95 \text{ }^{\circ}\text{C}$) und in Sto15 am kleinsten ($\Delta T_{\text{Jhd}} = 0,33 \text{ }^{\circ}\text{C}$; Abb. 7b). Im Vergleich zu den Jahrhunderten sind die Unterschiede zwischen den kältesten und wärmsten 30-Jahres Perioden bei den Rekonstruktionen ausgeglichener ($\Delta T_{\text{30-Jahr}}$ von 0,70 bis 1,15 $^{\circ}\text{C}$). Interessanterweise sind die jährlichen Amplituden in den Rekonstruktionen klein, die eine große Varianz bei den Jahrhunderten zeigen (z. B. Esp02 $\Delta T_{\text{jährlich}} = 1,73 \text{ }^{\circ}\text{C}$) und groß in den Rekonstruktionen mit kleinen Jahrhundert-Varianzen (z. B. Sto15 $\Delta T_{\text{jährlich}} = 2,44 \text{ }^{\circ}\text{C}$). Demnach verhalten sich $\Delta T_{\text{jährlich}}$ und ΔT_{Jhd} umgekehrt proportional (Abb. 7b unten). Das Verhältnis $\Delta T_{\text{Jhd}}/\Delta T_{\text{jährlich}}$ schrumpft von den früheren (Bri00, Esp02, DAr06) zu den neueren Rekonstruktionen (Sch15, Sto15, Wil16), was zeigt, dass hochfrequente Temperaturabweichungen in den neuen Arbeiten durch die Integration von MXD Daten betont werden. Diese Schlussfolgerung stimmt mit den Beobachtungen über eine erhöhte Autokorrelation der älteren Rekonstruktionen (siehe oben, Kapitel 3) und erhöhte Varianzen der im hochfrequenten Bereich in Sch15 und Sto15 (Kapitel 4) überein.

Diese Unterschiede in der Betonung hochfrequenter Temperaturabweichungen beeinflussen auch die Evaluation post-vulkanischer Kaltereignisse, die aus diesen Rekonstruktionen abgeleitet wurden (Abb. 8). Die älteren Rekonstruktionen (Bri00, Esp02, DAr06) zeigen im Vergleich zu Sch15, Sto15 und Wil16

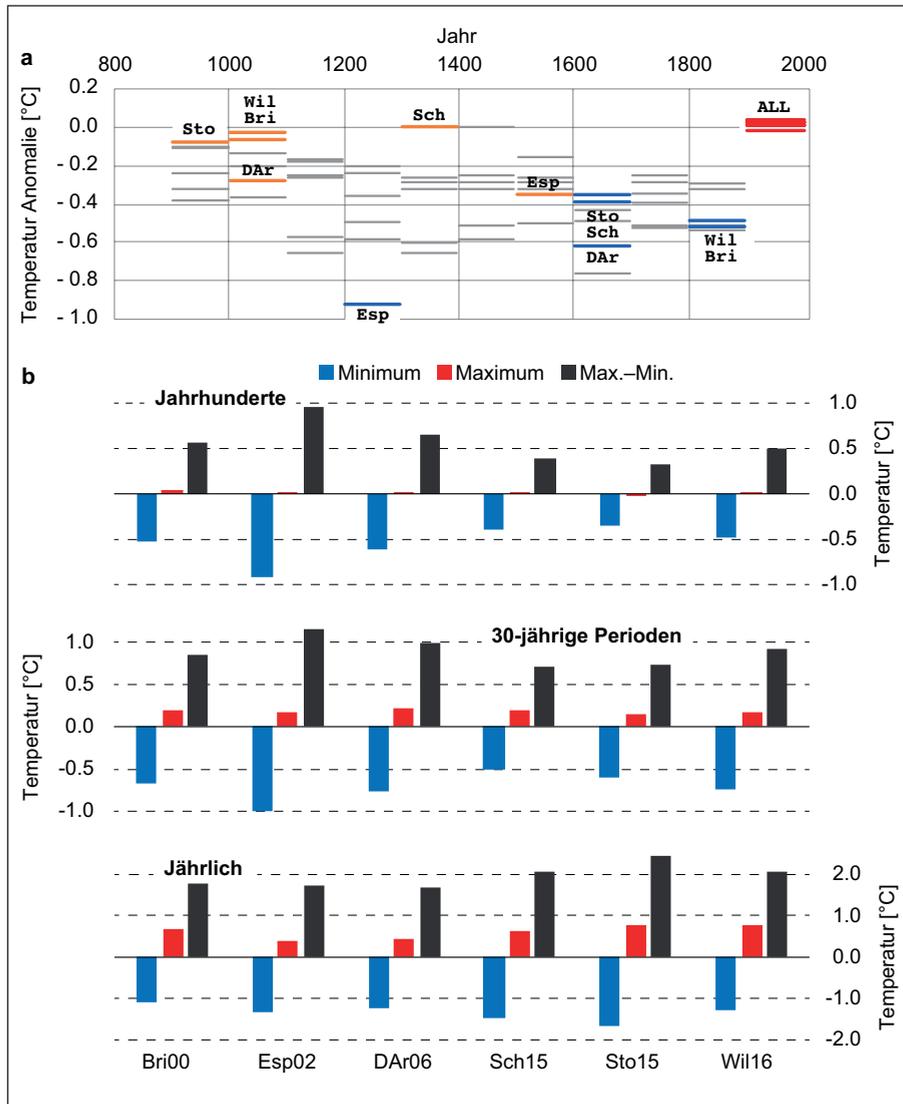


Abbildung 7: Rekonstruierte Temperaturen. **a**, Gemittelte Temperaturen der Jahrhunderte seit 900 n. Chr. Blaue Balken zeigen das kälteste rekonstruierte Jahrhundert jeder Rekonstruktion, orangene Balken die wärmsten Jahrhunderte vor 1900 und rote Balken das insgesamt wärmste Jahrhundert (20. Jahrhundert in allen Rekonstruktionen). **b**, Kälteste (blau) und wärmster (rot) rekonstruierte JJA-Temperatur der Jahrhunderte (oben), 30-jährige Zeiträume (Mitte) und einzelner Jahre (unten) sowie die Amplitude zwischen diesen Extremen (schwarz).

eine geringere und weniger ausgeprägte Abkühlung in den Jahren nach den großen Vulkanausbrüchen des letzten Jahrtausends. Das gedämpfte Signal in den frühen Rekonstruktionen ist auf die Dominanz von TRW Daten zurückzuführen, die nachweislich das Ausmaß solcher Kälteeinbrüche unterschätzen und die Persistenz post-vulkanischer Abkühlungsphasen überschätzen (Esper et al., 2015). Andererseits zeigen die neuen Rekonstruktionen alle ein ähnliches post-vulkanisches Abkühlungsmuster von $-0,63\text{ °C}$ ($-0,14\text{ °C}$) im ersten Jahr nach acht (34) Eruptionen des letzten Jahrtausends, obwohl die Autokorrelation erster Ordnung in Sto15 von allen anderen Rekonstruktionen abweicht und über dem Wert der instrumentellen Daten liegt (Abb. 3). Die interannuelle Variabilität ist in Sto15 und Sch15 im vergangenen Jahrtausend durchgehend größer als in jeder anderen Rekonstruktion, einschließlich Wil16 (Abb. 4). Die Wil16 Rekonstruktion liegt zwischen den Extremen und entspricht weitgehend der Autokorrelation großräumiger Sommertemperaturdaten. Wil16 zeigt post-vulkanische Abkühlungen ähnlich den Sch15 und Sto15 Rekonstruktionen im ersten Jahr nach dem Ausbruch, allerdings ist die anschließende Erholung deutlich verzögert.

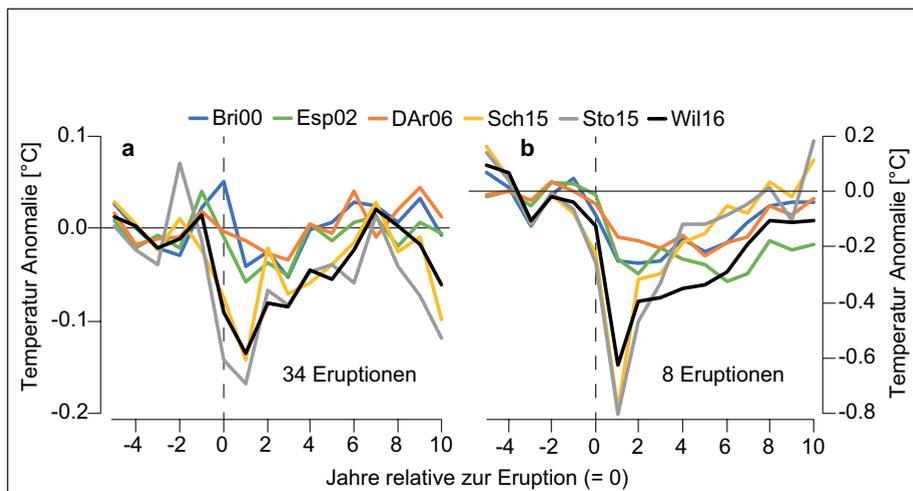


Abbildung 8: Post-vulkanische Abkühlungsmuster in großräumigen Temperaturrekonstruktionen. **a**, JJA Temperaturabweichungen 5 Jahre vor und 10 Jahre nach 34 großen Vulkanausbrüchen des vergangenen Jahrtausends ($VEI \geq 4$; Esper et al., 2013). **b**, Entsprechend a, aber unter Verwendung der acht größten Eruptionen nach Esper et al. (2017).

6. Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Seit den späten 1990er Jahren wurden deutliche Verbesserungen bei den Rekonstruktionen der Sommertemperaturen des letzten Jahrtausends erzielt. Während die erste Generation großräumiger Rekonstruktionen (Bri00, Esp02 und DAr06) nur einen Bruchteil der Temperaturvarianz der instrumentellen Daten im hemisphärischen Maßstab erklärte, und insbesondere bei den hochfrequenten Variationen nicht gut abschneiden, zeigen die seit 2015 veröffentlichten neuen Rekonstruktionen (Sch15, Sto15, Wil16) bessere Kalibrationsresultate im Bereich von ~50 % erklärte Varianz der großräumigen Sommertemperaturen und kalibrieren mit Abstrichen auch im interannuellen Bereich (~30 % erklärte Varianz). Diese Verbesserungen resultieren aus der Integration zusätzlicher MXD Chronologien in die Baumringnetzwerke (insbesondere in Sch15 die ausschließlich MXD nutzt) und aus der Erweiterung der Netzwerke und damit der Verbesserung der räumlichen Abdeckung der nordhemisphärischen Außertropen (insbesondere in Sto15 und Wil16). Das Ungleichgewicht zwischen gut replizierten jüngeren Jahrhunderten (einschließlich der Kalibrierungsphase des 20. Jahrhunderts) und deutlich schwächer replizierten frühen Jahrhunderten bleibt jedoch auch in den neueren Rekonstruktionen bestehen. Die dramatisch reduzierte Belegung vor 1400 n. Chr. scheint auch der Hauptgrund für den Rückgang der Korrelation zwischen den Rekonstruktionen zu sein, was zeigt, dass unser Verständnis der großräumigen Temperaturvariabilität während der MWP und des Übergangs in die LIA noch immer begrenzt ist. Der Korrelationsrückgang vor 1400 ist angesichts der Tatsache, dass einige der längsten Standortchronologien (z. B. Torneträsk in Nordschweden) in allen Rekonstruktionen verwendet werden, überraschend. Aufgrund der Wiederverwendung von Daten wäre eigentlich eine höhere Korrelation in die Vergangenheit zu erwarten.

Die drei kürzlich veröffentlichten Rekonstruktionen – Sch15, Sto15 und Wil16 – stellen einen großen Fortschritt dar. Es wird empfohlen, alle drei Rekonstruktionen für die Bewertung von Temperaturänderungen der warmen Jahreszeit auf unterschiedlichen Zeitskalen zu verwenden. Eine einfache Mittelbildung ist allerdings aufgrund der (zeitlich variierenden) Datenüberschneidung nicht ratsam. Ein wesentlicher Unterschied zwischen den drei aktuellen Rekonstruktionen sind die deutlich wärmeren rekonstruierten Temperaturen im 14. Jahrhundert in der rein MXD-basierten Sch15 Rekonstruktion. Um zu beurteilen, ob diese Abweichung, die den Übergang in die LIA um ~100–200 Jahre verschiebt, robust ist,

bedarf es weiterer Forschung und der Verbesserung des hemisphärischen Jahrringnetzwerks. Im hochfrequenten Bereich zeigen die neuen Rekonstruktionen ähnliche post-vulkanische Abkühlungsmuster, obwohl hier Hinweise für eine unterschätzte Autokorrelation in Sto15 vorliegen.

Basierend auf dieser Bewertung werden vier Forschungsprioritäten benannt, die unser Verständnis der Klimavariabilität des letzten Jahrtausends verbessern werden:

- (1) Standortchronologien müssen aktualisiert werden, um die letzten Jahrzehnte abzudecken. Viele der in den Netzwerken enthaltenen Standortchronologien wurden in den 1980er und 1990er Jahren entwickelt, wodurch eine Kalibrierung mit instrumentellen Daten inklusive der extrem warmen letzten Jahrzehnte ausgeschlossen ist.
- (2) Entwicklung temperatursensitiver Chronologien, die das gesamte Jahrtausend abdecken. Der deutliche Verlust an Kovarianz vor dem 1400 n. Chr. weist auf eine Abnahme der klimatischen Signalstärke hin. Diese hängt mit der reduzierten Anzahl an Standortchronologien und der Reduktion der Bäumen pro Standortchronologie zusammen und erschwert die Beurteilung des Übergangs aus der MWP in die LIA.
- (3) Es müssen mehr MXD Chronologien produziert werden. Die Einbeziehung von MXD Chronologien hat die neueren Rekonstruktionen deutlich verbessert, insbesondere im Hochfrequenzbereich. Eine weitere Erstellung dieser (recht teuren) Zeitreihen wird deshalb empfohlen.
- (4) Die Auswirkungen von Replikationsänderungen auf die Qualität der Rekonstruktionen müssen (besser) berücksichtigt werden. Die Änderung der Belegung von tausenden von Jahrringserien im 20. Jahrhundert zu einigen hundert Jahrringserien in den frühen Zeiten muss in die Berechnungen der Unsicherheiten einfließen. Die neuen Arbeiten (Sch15, Sto15, Wil16) enthalten Ansätze, um dieses Ziel zu erreichen. Allerdings müssen die in den Netzwerken enthaltenen Messreihen vollständig verfügbar gemacht werden, um diese Methoden zu vergleichen und zu verbessern.

Danksagungen

Ich danke Keith Briffa und Fritz Schweingruber für ihre bahnbrechenden Arbeiten zur großräumigen Temperaturrekonstruktion. Unterstützt durch das Gutenberg Forschungskolleg (GFK-Fellowship), die Deutsche Forschungsgemeinschaft (161/12-1), SustES (CZ.02.1.01/0.0/0.0/16_019/0000797) und ERC Advanced Grant (882727).

Literatur

- Anchukaitis, KJ, et al., 2012. Baumringe und vulkanische Abkühlung. *Natur Geosci.* 5, 836–837.
- Anchukaitis, KJ, et al., 2017. Sommertemperaturen der nördlichen Hemisphäre im letzten Jahrtausend aus Baumringen: Teil II, räumlich aufgelöste Rekonstruktionen. *Quat. Wissenschaft. Rev.* 163, 1–22.
- Böhm, R., Auer, I., Brunetti, M., Maugeri, M., Nanni, T., Schöner, W., 2001. Regional temperature variability in the European Alps: 1760–1998 from homogenized instrumental time series. *Int. J. Klimat.* 21, 1779–1801.
- Böhm, R., Jones, PD, Hiebl, J., Frank, D., Brunetti, M., Maugeri, M., 2010. The early instrumental warm-bias: a solution for long central European temperature series 1760–2007. *Klima. Ändern Sie* 101, 41–67.
- Bothe, O., et al., 2015. Continental-scale temperature variability in PMIP3 simulations and PAGES 2k regional temperature reconstructions over the last millennium. *Klima. Nach* 11, 1673–1699.
- Briffa, KR, 2000. Jährliche Klimavariabilität im Holozän: Interpretation der Botschaft alter Bäume. *Quat. Wissenschaft. Rev.* 19, 87–105.
- Briffa, KR, Schweingruber, FH, Jones, PD, Osborn, TJ, Shiyatov, SG, Vaganov, EA, 1998. Reduzierte Temperaturempfindlichkeit des jüngsten Baumwachstums in hohen nördlichen Breiten. *Natur* 391, 678–682.
- Briffa, KR, Osborn, TJ, 2002. Heiß und kalt. *Wissenschaft* 295, 2227–2228.
- Büntgen, U., et al., 2015. Baumringverstärkung der sommerlichen Abkühlung des frühen 19. Jahrhunderts in Mitteleuropa. *J. Clim.* 28, 5272–5288.
- Büntgen, U., et al., 2018. Globale Signatur kosmogener Ereignisse. *Wissenschaft, im Druck.*
- Christiansen, B., Ljungqvist, FC, 2011. Rekonstruktion der extratropischen NH-Mitteltemperatur über das letzte Jahrtausend mit einer Methode, die die niederfrequente Variabilität bewahrt. *J. Clim.* 24, 6013–6034.
- Christiansen, B., Ljungqvist, FC, 2012. Die außertropische Temperatur der nördlichen Hemisphäre in den letzten zwei Jahrtausenden: Rekonstruktionen der niederfrequenten Variabilität. *Clim Vergangenheit* 8**, 765–786.

- Christiansen, B., Ljungqvist, FC, 2017. Herausforderungen und Perspektiven für groß angelegte Temperaturrekonstruktionen der letzten zwei Jahrtausende. *Rev. Geophys.* 55, 4096.
- Cook, ER, Briffa, KR, Jones, PD, 1994. Räumliche Regressionsmethoden in der Dendroklimatologie: eine Überprüfung und ein Vergleich zweier Techniken. *Int. J. Klimat.* 14, 379-402.
- Cook, ER, Krusic, PJ, Anchukaitis, KJ, Buckley, BM, Nakatsuka, T., Sano, M., 2013. Baumringe rekonstruierten Sommertemperaturanomalien für das gemäßigte Ostasien seit 800 n. Chr. *Klima. Dyn.* 41, 2957-2972.
- Crowley, TJ, Lowery, TS, 2000. Wie warm war die mittelalterliche Warmzeit? *Ambio* 29, 51-54.
- Crutzen, PJ, 2002. Geologie der Menschheit. *Natur* 415, 23.
- D'Arrigo, R., Wilson, R., Jacoby, G., 2006. Über den langfristigen Kontext der Erwärmung im späten zwanzigsten Jahrhundert. *J. Geophys. Auflösung* 111 , <http://dx.doi:10.1029/2005JD006352>
- D'Arrigo, R., Wilson, R., Liepert, B., Cherubini, P., 2008. Zum „Divergenzproblem“ in nördlichen Wäldern: eine Überprüfung der Baumringbeweise und möglicher Ursachen. *Glob. Planen. Änderung* 60, 289-305.
- De Silva, SL, Zielinski, GA, 1998. Globaler Einfluss des Ausbruchs von Huaynaputina im Jahr 1600, Peru. *Natur* 393, 455-458.
- Esper, J., Cook, ER, Schweingruber, FH, 2002. Niederfrequente Signale in langen Baumring-Chronologien und die Rekonstruktion vergangener Temperaturschwankungen. *Wissenschaft* 295, 2250-2253.
- Esper, J., Frank, DC, Wilson, RJS, Briffa, KR, 2005. Auswirkung von Skalierung und Regression auf die rekonstruierte Temperaturamplitude für das vergangene Jahrtausend. *Geophysik. Auflösung Lette.* 32, <http://dx.doi:10.1029/2004GL021236>
- Esper, J., Frank, DC, 2009. Fallstricke bei Abweichungen in der Jahrringforschung. *Klima. Änderung* 94, 261-266.
- Esper, J., Schneider, L., Krusic, PJ, Luterbacher, J., Büntgen, U., Timonen, M., Sirocko, F., Zorita, E., 2013. European summer temperature response to annual dated volcanic eruptions in den vergangenen neun Jahrhunderten. *Stier. Vulkan.* 75, <http://dx.doi:10.1007/s00445-013-0736-z>.
- Esper, J., Duthorn, E., Krusic, P., Timonen, M., Büntgen, U., 2014. Nordeuropäische sommerliche Temperaturschwankungen über die Zeitrechnung aus integrierten Baumringdichteaufzeichnungen. *J. Quat. Wissenschaft.* 29, 487-494.
- Esper, J., Schneider, L., Smerdon, J., Schöne, B., Büntgen, U., 2015. Signals and memory in tree-ring width and density data. *Dendrochronologia* 35, 62-70.
- Esper J, et al., 2016. Ranking von baumringbasierten Temperaturrekonstruktionen des vergangenen Jahrtausends. *Quat. Wissenschaft. Rev.* 145, 134-151.
- Esper, J., Büntgen, U., Hartl-Meier, C., Oppenheimer, C., Schneider, L., 2017. Temperaturanomalien der nördlichen Hemisphäre während der 1450er-Periode des mehrdeutigen vulkanischen Antriebs. *Stier. Vulkan.* 79, 41, <http://dx.doi:10.1007/s00445-017-1125-9>.

- Fernández-Donado, L., et al., 2013. Temperaturreaktion auf externen Antrieb in Simulationen und Rekonstruktionen des letzten Jahrtausends. *Klima. Nach* 9, 393–421.
- Frank, D., Esper, J., 2005. Temperaturrekonstruktionen und Vergleiche mit instrumentellen Daten aus einem Baumringnetzwerk für die europäischen Alpen. *Int. J. Klimat.* 25, 1437–1454.
- Frank, D., Büntgen, U., Böhm, R., Maugeri, M., Esper, J., 2007a. Wärmere frühe instrumentelle Messungen versus kältere rekonstruierte Temperaturen: Schießen auf ein sich bewegendes Ziel. *Quat. Wissenschaft. Rev.* 26, 3298–3310.
- Frank, D., Esper, J., Cook, ER, 2007b. Anpassung für Proxy-Zahl und Kohärenz in einer großräumigen Temperaturrekonstruktion. *Geophysik. Auflösung Lette.* 34, <http://dx.doi:10.1029/2007GL030571>.
- Frank, D., Esper, J., Zorita, E., Wilson, RJS, 2010. Eine Nudel, ein Hockeyschläger und ein Spaghettiteller: eine Perspektive auf hochauflösende Paläoklimatologie. *Wiley Interdisc. Rev. Clim. Ändern Sie* 1, 507–516.
- Goosse, H., 2017. Rekonstruierte und simulierte Temperaturasymmetrie zwischen Kontinenten in beiden Hemisphären über die letzten Jahrhunderte. *Klima. Dyn.* 48, 1483–1501.
- Grudd, H., 2008. Breite und Dichte von Torneträsk-Baumringen 500–2004 n. Chr.: Ein Test der Klimasensitivität und eine neue 1500-jährige Rekonstruktion der nordfennoskandischen Sommer. *Klima. Dyn.* 31: 843–857.
- Guillet, S., et al., 2017. Klimareaktion auf den Samalas-Vulkanausbruch im Jahr 1257, offenbart durch Proxy-Aufzeichnungen. *Natur Geosci.* 10, 123–128.
- Harris, I., Jones, PD, Osborn, TJ, Lister, DH, 2014. Aktualisierte hochauflösende Raster monatlicher Klimabeobachtungen – der CRU TS3.10-Datensatz. *Int. J. Klimat.* 34, 623–642.
- Hartl – Meier, CTM, Büntgen, U., Smerdon, JE, Zorita, E., Krusic, PJ, Ljungqvist, FC, Schneider, L., Esper, J., 2017. Temperature covariance in tree ring recoverys and model simulations over das vergangene Jahrtausend. *Geophysik. Auflösung Lette.* 44, 9458–9469.
- Hegerl, GC, Crowley, TJ, Allen, M., Hyde, WT, Pollack, HN, Smerdon, J., Zorita, E., 2007. Nachweis des menschlichen Einflusses auf eine neue, validierte 1500-Jahre-Temperaturrekonstruktion. *J. Clim.* 20, 650–666.
- Jones, PD, Briffa, KR, Barnett, TP, Tett, SFB, 1998. Hochauflösende paläoklimatische Aufzeichnungen für das letzte Jahrtausend: Interpretation, Integration und Vergleich mit Kontrolllauftemperaturen des allgemeinen Zirkulationsmodells. *Holozän* 8, 455–471.
- Juckles, M.N., Allen, M.R., Briffa, K.R., Esper, J., Hegerl, G.C., Moberg, A., Osborn, T.J., Weber, S.L., 2007. Millennial temperature reconstruction intercomparison and evaluation. *Clim. Past* 3, 591–609.
- Lamb, H.H., 1972. *Climate: Present, Past and Future. Volume 1: Fundamentals and Climate Now.* Methuen, London, pp. 613.
- Lavigne, F., et al., 2013. Source of the great AD 1257 mystery eruption unveiled, Samalas volcano, Rinjani Volcanic Complex, Indonesia. *PNAS* 110, 16742–16747.

- Liedtke, H., 1981. Die nordischen Vereisungen in Mitteleuropa. *Forschungen zur deutschen Landeskunde* 204, pp. 160.
- Ljungqvist, FC, 2010. Eine neue Rekonstruktion der Temperaturvariabilität in der extratropischen nördlichen Hemisphäre während der letzten zwei Jahrtausende. *Geografiska Ann.* 92, 339–351.
- Ljungqvist, FC, Krusic, PJ, Sundqvist, HS, Zorita, E., Brattström, G., Frank, D., 2016. Variabilität des Hydroklimas der nördlichen Hemisphäre in den letzten zwölf Jahrhunderten. *Natur* 532, 94–98.
- Loehle, C., 2007. Eine globale Temperaturrekonstruktion über 2000 Jahre basierend auf Nicht-Treeing-Proxys. *Energie Umgebung*. 18, 1049–1058.
- Luterbacher, J., et al., 2016. Europäische Sommertemperaturen seit der Römerzeit. *Umgebung. Auflösung Lette*. 11, <http://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/11/2/024001>
- Mann, ME, Bradley, RS, Hughes, MK, 1999. Temperaturen der nördlichen Hemisphäre während des vergangenen Jahrtausends: Schlussfolgerungen, Unsicherheiten und Einschränkungen. *Geophysik. Auflösung Lette*. 26, 759–762.
- Mann, ME, Jones, PD, 2003. Globale Oberflächentemperaturen in den letzten zwei Jahrtausenden. *Geophysik. Auflösung Lette*. 30, <http://dx.doi.org/10.1029/2003GL017814>
- Mann, ME, Zhang, Z., Hughes, MK, Bradley, RS, Miller, SK, Rutherford, S., Ni, F., 2008. Proxy-basierte Rekonstruktionen von Schwankungen der hemisphärischen und globalen Oberflächentemperatur in den letzten zwei Jahrtausenden. *PNAS* 105, 13252–13257.
- Melvin, TM, Grudd, H., Briffa KR, 2013. Mögliche Verzerrung bei der „Aktualisierung“ von Baumring-Chronologien unter Verwendung der Regional Curve Standardization: Reprocessing the Torneträsk maximum-latewood-density data. *Holozän* 23, 364–373.
- Moberg, AD, Sonechkin, M., Holmgren, K., Datsenko, NM, Karlén, W., 2005. Hochvariable Temperaturen der nördlichen Hemisphäre, rekonstruiert aus Proxy-Daten mit niedriger und hoher Auflösung. *Natur* 433, 613–617.
- Neukom, R., Gergis, J., 2012. Hochauflösende Paläoklimaaufzeichnungen der südlichen Hemisphäre der letzten 2000 Jahre. *Holozän* 22, 501–524.
- Neukom, R., et al., 2014. Interhemisphärische Temperaturvariabilität im vergangenen Jahrtausend. *Natur Klima. Veränderung* 4, 362–367.
- Oppenheimer, C., 2003. Klimatische, ökologische und menschliche Folgen des größten bekannten historischen Ausbruchs: Vulkan Tambora (Indonesien) 1815. *Progr. Phys. Geogr.* 27, 230–259.
- Osborn, TJ, Biffa, KR, Jones, PD, 1997. Anpassen der Varianz für die Stichprobengröße in Baumring-Chronologien und anderen Zeitreihen mit regionalen Mittelwerten. *Dendrochronologie* 15, 89–99.
- PAGES 2k Consortium, 2013. Continental-scale temperature variability over the Common Era. *Natur Geosc.* 6, 339–346.
- Parker, DE, 1994. Auswirkungen wechselnder Exposition von Thermometern an Landstationen. *Int. J. Klimat.* 14, 1–31.
- Phipps, SJ, et al., 2013. Paläoklimadaten-Modellvergleich und die Rolle des Klimaantriebs in den letzten 1500 Jahren. *J. Clim.* 26, 6915–6–36.

- Qian, WH, Hu, Q., Zhu, YF, Lee, DK, 2003. Hundertjährige Trocken-Feucht-Variationen in Ostasien. *Klima. Dyn.* 21, 77–89.
- Raible, CC, et al., 2016. Tambora 1815 als Testfall für hochwirksame Vulkanausbrüche: Auswirkungen auf das Erdsystem. *Drähte Clim. Änderung* 7, 569–589.
- Rohde, R., et al., 2013. Eine neue Schätzung der durchschnittlichen Landtemperatur der Erdoberfläche von 1753 bis 2011. *Geoinfor. Geostat. Übersicht* 1, <http://dx.doi.org/10.4172/2327-4581.1000101>.
- Rohling, EJ, 2017. *Die Ozeane: Eine tiefe Geschichte*. Princeton University Press, Princeton, S. 272.
- Schneider, L., Smerdon, J., Büntgen, U., Wilson, R., Myglan, VS, Kirilyanov, A., Esper, J. (2015) Revising midlatitude summer temperatures back to AD 600 based on a wood density network. *Geophysik. Auflösung Lette.* 42, <http://dx.doi.org/10.1002/2015GL063956>
- Radiodensitometrische -dendroklimatologische Chronologien von Nadelbäumen aus Lappland (Skandinavien) und den Alpen (Schweiz). *Boreas* 17, 559–566.
- Shi, F., Yang, B., Mairesse, A., Von Gunten, L., Li, J., Bräuning, A., Yang, F., Xiao, X., 2013. Temperaturrekonstruktion der nördlichen Hemisphäre während der letzten Millennium unter Verwendung mehrerer jährlicher Proxys. *Klima. Auflösung* 56, 231–244.
- Siddall, M., Rohling, EJ, Almogi-Labin, A., Hemleben, C., Meischner, D., Schmelzer, I., Smeed, DA, 2003. Meeresspiegelschwankungen während des letzten Eiszeitzyklus. *Natur* 423, 853–858.
- Smerdon, JE, Pollack, HN, 2016. Rekonstruktion der Oberflächentemperatur der Erde in den letzten 2000 Jahren: die Wissenschaft hinter den Schlagzeilen. *Wiley Interdisc. Rev. Clim. Ändern* Sie 7, 746–771.
- Stoffel, M., et al., 2015. Schätzungen der vulkanisch induzierten Abkühlung in der nördlichen Hemisphäre in den letzten 1.500 Jahren. *Natur GeoSci.* 8, <http://dx.doi.org/10.1038/NGEO2526>
- Stothers, RB, 1984. Der große Ausbruch des Tambora im Jahr 1815 und seine Folgen. *Wissenschaft* 224, 1191–1198.
- van Engelen, AFV, Buisman, J., Ijnsen, F., 2001. Ein Jahrtausend Wetter, Wind und Wasser in den Niederungen. In: Jones, PD, Davies, TD, Ogilvie, AEJ, Briffa, KR (Hrsg.), *History and Climate: Memories of the Future?* Kluwer, Dordrecht, S. 101–124.
- Vidal, CM, Métrich, N., Komorowski, JC, Pratomo, I., Michel, A., Kartadinata, N., Robert, V. Lavigne, F., 2016. The 1257 Samalas eruption (Lombok, Indonesia): the einzelne größte stratosphärische Gasfreisetzung der Zeitrechnung. *Wissenschaftler. Rep.* 6. <http://dx.doi.org/10.1038/srep34868>.
- Wilson, RJS, et al., 2016. Sommertemperaturen der nördlichen Hemisphäre im letzten Jahrtausend von Baumringen. Teil I: Der langfristige Kontext. *Quat. Wissenschaft. Rev.* 134, 1–18.
- Xing, P., Chen, X., Luo, Y., Nie, S., Zhao, Z., Huang, J., Wang, S. 2016. Die Temperaturrekonstruktion der extratropischen Nordhemisphäre während des letzten Jahrtausends basierend auf einem Roman Methode. *Plus* eins 11, <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0146776>.