

---

EINGELADENE BEWERTUNGEN • KOSTENLOSER ARTIKEL

# Wie stark hat die Sonne die Temperaturtrends auf der Nordhalbkugel beeinflusst? Eine anhaltende Debatte

Ronan Connolly <sup>1,2</sup>, Willie Soon <sup>1</sup>, Michael Connolly <sup>2</sup>, Sallie Baliunas <sup>3</sup>, Johan Berglund <sup>4</sup>, C. John Butler <sup>5</sup>, Rodolfo Gustavo Cionco <sup>6,7</sup>, Ana G. Elias <sup>8,9</sup>, Valery M. Fedorov <sup>10</sup>, Hermann Harde <sup>11</sup>, Gregory W. Henry <sup>12</sup>, Douglas V. Hoyt <sup>13</sup>, Ole Humlum <sup>14</sup>, David R. Legates <sup>15</sup>, Sebastian Lüning <sup>16</sup>, Nicola Scafetta <sup>17</sup>, Jan-Erik Solheim <sup>18</sup>, László Szarka <sup>19</sup>, Harry van Loon <sup>20</sup>, Víctor M. Velasco Herrera <sup>21</sup>, Richard C. Willson <sup>22</sup>, Hong Yan (艳洪) <sup>23</sup> und Weijia Zhang <sup>24,25</sup> – Vollständige Autorenliste ausblenden

© 2021 National Astronomical Observatories, CAS und IOP Publishing Ltd. Forschung in Astronomie und Astrophysik, Band 21, Nummer 6

**Zitat** Ronan Connolly *et al.* 2021 *Res. Astron. Astronomien.* **21** 131

**DOI** 10.1088/1674-4527/21/6/131

---

ronan@ceres-science.com

<sup>1</sup> Zentrum für Umweltforschung und Geowissenschaften (CERES), Salem, MA 01970, USA

<sup>2</sup> unabhängige Wissenschaftler, Dublin, Irland

<sup>3</sup> Im Ruhestand, ehemals Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics, Cambridge, MA 02138, USA

<sup>4</sup> Unabhängiger Forscher, Malmö, Schweden

<sup>5</sup> Retired, formerly Armagh Observatory, College Hill, Armagh BT61 9DG, Northern Ireland, UK

<sup>6</sup> Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires, Argentina

<sup>7</sup> Grupo de Estudios Ambientales, Universidad Tecnológica Nacional, Colòn 332, San Nicolás (2900), Buenos Aires, Argentina

<sup>8</sup> Laboratorio de Física de la Atmósfera, Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología, Universidad Nacional de Tucumán, Av. Independencia 1800, 4000 Tucumán, Argentina

<sup>9</sup> Instituto de Física del Noroeste Argentino (Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas - Universidad Nacional de Tucumán), 4000 Tucumán, Argentina

<sup>10</sup> Faculty of Geography, Lomonosov, Moscow State University, Leninskie Gory St. 1, Moscow 119991, Russia

<sup>11</sup> Helmut-Schmidt-University, Hamburg, Germany

<sup>12</sup> Center of Excellence in Information Systems, Tennessee State University, Nashville, TN 37209 USA

<sup>13</sup> Independent scientist, Berkeley Springs, WV, USA

<sup>14</sup> Emeritus Professor in Physical Geography, Department of Geosciences, University of Oslo, Norway

<sup>15</sup> College of Earth, Ocean, and the Environment, University of Delaware, Newark DE 19716-2541, USA

<sup>16</sup> Institute for Hydrography, Geoecology and Climate Sciences, Hauptstraße 47, 6315 Ägeri, Switzerland

<sup>17</sup> Department of Earth Sciences, Environment and Georesources, University of Naples Federico II, Complesso Universitario di Monte S. Angelo, via Cinthia, 21, 80126 Naples, Italy

<sup>18</sup> Retired, formerly Department of Physics and Technology, UiT The Arctic University of Norway, 9037 Tromsø, Norway

<sup>19</sup> ELKH Institute of Earth Physics and Space Science, 9400 Sopron, Csatkai utca 6-8, Hungary

<sup>20</sup> Retired, formerly National Center for Atmospheric Research, Boulder, Colorado, USA

<sup>21</sup> Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, Coyoacán, 04510, México D.F., México

<sup>22</sup> Active Cavity Radiometer Irradiance Monitor (ACRIM), Coronado, CA 92118, USA


<sup>23</sup> State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China

<sup>24</sup> Department of Mathematics and Physics, Shaoxing University, Shaoxing, China

<sup>25</sup> Department of AOP Physics, University of Oxford, Oxford, UK

1. Received 7 December 2020

2. Accepted 14 April 2021

 Journal RSS

Sign up for new issue notifications

Create citation alert

## Abstrakt

Um zu beurteilen, wie stark die Gesamtsonneneinstrahlung (TSI) die Entwicklung der Oberflächenlufttemperatur auf der nördlichen Hemisphäre beeinflusst hat, ist es wichtig, zuverlässige Schätzungen beider Größen zu haben. Sechzehn verschiedene Schätzungen der TSI-Änderungen seit mindestens dem 19. Jahrhundert wurden aus der Literatur zusammengestellt. Die Hälfte dieser Schätzungen weist „geringe Variabilität“ und die andere Hälfte „hohe Variabilität“ auf. Mittlerweile wurden fünf weitgehend unabhängige Methoden zur Schätzung der Temperaturtrends der nördlichen Hemisphäre evaluiert, wobei: 1) nur ländliche Wetterstationen verwendet wurden; 2) alle verfügbaren Stationen, egal ob in der Stadt oder auf dem Land (Standardansatz); 3) nur Meeresoberflächentemperaturen; 4) Baumringbreiten als Temperatur-Proxies; 5)

Gletscherlängenaufzeichnungen als Temperatur-Proxies. Die Standardschätzungen, die sowohl städtische als auch ländliche Stationen verwenden, waren etwas ungewöhnlich, da sie eine viel stärkere Erwärmung in den letzten Jahrzehnten implizierten als die anderen Schätzungen, was darauf hindeutet, dass der Urbanisierungsbias in aktuellen globalen Temperaturdatensätzen immer noch ein Problem darstellen könnte – trotz der Schlussfolgerungen einiger früherer Daten Studien.

Dennoch, Jahrhundert, d. h. seit dem 19. Jahrhundert gab es eine gewisse „globale Erwärmung“. Jahrhundert. Für jede der fünf Schätzungen der Temperaturen der nördlichen Hemisphäre wurde der Beitrag des direkten Sonnenantriebs für alle sechzehn TSI-Schätzungen mithilfe einer einfachen linearen Anpassung der kleinsten Quadrate bewertet. Die Rolle menschlicher Aktivitäten bei der jüngsten Erwärmung wurde dann berechnet, indem die Restwerte an die vom UN-IPCC empfohlenen Zeitreihen für „anthropogene Antriebe“ angepasst wurden. Für alle fünf Temperaturreihen der nördlichen Hemisphäre deuten unterschiedliche TSI-Schätzungen auf alles hin, von keiner Rolle der Sonne in den letzten Jahrzehnten (was impliziert, dass die jüngste globale Erwärmung größtenteils vom Menschen verursacht ist) bis hin zum Großteil der jüngsten globalen Erwärmung, die auf Veränderungen der Sonnenaktivität zurückzuführen ist (das ist, dass die jüngste globale Erwärmung größtenteils natürlicher Natur ist. Es scheint, dass frühere Studien (einschließlich der jüngsten IPCC-Berichte), die erstere vorzeitig abgeschlossen hatten, dies hatten sie getan, weil sie es versäumt hatten, alle relevanten TSI-Schätzungen angemessen zu berücksichtigen und/oder die Unsicherheiten, die immer noch mit Schätzungen des Temperaturtrends in der nördlichen Hemisphäre verbunden sind, zufriedenstellend zu berücksichtigen. Daher werden mehrere Empfehlungen gegeben, wie die wissenschaftliche Gemeinschaft diese Probleme zufriedenstellender lösen kann.

Zitat und Zusammenfassung exportieren

BibTeX

RIS

**Nächster** Artikel in der Ausgabe ▶

## 1. Einleitung

Die Arbeitsgruppe 1 des Zwischenstaatlichen Gremiums für Klimaänderungen (IPCC) der Vereinten Nationen kam in ihrem jüngsten (5. ) Sachstandsbericht (IPCC 2013a ) zu dem Schluss, dass:

*„Jedes der letzten drei Jahrzehnte war an der Erdoberfläche sukzessive wärmer als jedes Jahrzehnt davor seit 1850 [...] In der nördlichen Hemisphäre war 1983–2012 **wahrscheinlich** der wärmste 30-Jahres-Zeitraum der letzten 1400 Jahre“* (IPCC Zusammenfassung der Arbeitsgruppe 1 für politische Entscheidungsträger, 2013, S. 3 – Hervorhebung im Original) (IPCC 2013b )

Und das:

„*Es ist **äußerst wahrscheinlich**, dass menschlicher Einfluss die Hauptursache für die beobachtete Erwärmung seit der Mitte des 20. Jahrhunderts ist [ ...] Es ist **äußerst wahrscheinlich**, dass mehr als die Hälfte des beobachteten Anstiegs der globalen durchschnittlichen Oberflächentemperatur von 1951 bis 2010 wurde durch den anthropogenen Anstieg der Treibhausgaskonzentrationen und andere anthropogene Faktoren zusammen verursacht. Die beste Schätzung des vom Menschen verursachten Beitrags zur Erwärmung ähnelt der beobachteten Erwärmung in diesem Zeitraum.*“ (Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger der IPCC-Arbeitsgruppe 1, 2013, S. 15 – Hervorhebung im Original) (IPCC 2013b )

Mit anderen Worten, der 5. Sachstandsbericht (AR5) des IPCC <sup>beantwortete</sup> im Wesentlichen die Frage, die wir im Titel unseres Artikels gestellt hatten: „*Wie stark hat die Sonne die Temperaturtrends auf der Nordhalbkugel beeinflusst?*“ mit: „Fast nichts, zumindest seit Mitte.“ -20. Jahrhundert“ (um die obige Aussage zu paraphrasieren). Dies folgte einer ähnlichen Schlussfolgerung aus dem 4. Sachstandsbericht (AR4) (2007) des IPCC :

„*Der größte Teil des beobachteten Anstiegs der globalen Durchschnittstemperaturen seit Mitte des 20. Jahrhunderts ist sehr wahrscheinlich auf den beobachteten Anstieg der anthropogenen Treibhausgaskonzentrationen zurückzuführen*“ (Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger der IPCC-Arbeitsgruppe 1, 2007, S. 10 – Hervorhebung im Original) (Intergovernmental Panel on Climate Change 2007 )

Dies wiederum folgte einer ähnlichen Schlussfolgerung aus ihrem 3. Sachstandsbericht (2001):

„*...der Großteil der beobachteten Erwärmung in den letzten 50 Jahren dürfte auf den Anstieg der Treibhausgaskonzentrationen zurückzuführen sein.*“ (Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger der IPCC-Arbeitsgruppe 1, 2001, S. 10) (Houghton et al. 2001 )

Tatsächlich gab es in diesem Zeitraum auch mehrere gut zitierte Rezensionen und Artikel, die zu derselben Schlussfolgerung kamen. Zum Beispiel: Crowley ( 2000 ); Stott et al. ( 2001 ); Laut ( 2003 ); Haigh ( 2003 ); Damon & Laut ( 2004 ); Benestad ( 2005 ); Foukal et al. ( 2006 ); Bard & Frank ( 2006 ); Lockwood & Fröhlich ( 2007 ); Hegerl et al. ( 2007 ); Lean & Rind ( 2008 ); Benestad & Schmidt ( 2009 ); Gray et al. ( 2010 ); Lockwood ( 2012 ); Jones et al. ( 2013 ); Sloan & Wolfendale (2013 ); Gil-Alana et al. ( 2014 ); Lean ( 2017 ).

Andererseits wurden im gleichen Zeitraum auch viele Rezensionen und Artikel veröffentlicht, die zu dem gegenteiligen Schluss kamen, nämlich dass ein Großteil der globalen Erwärmung seit der Mitte des 20. Jahrhunderts und früher durch die solare Variabilität erklärt werden <sup>könnte</sup> . Zum Beispiel:

Soon et al. ( 1996 ); Hoyt & Schatten ( 1997 ); Svensmark & Friis-Christensen ( 1997 ); Bald et al. ( 2000b , a ); Bond et al. ( 2001 ); Willson & Mordvinov ( 2003 ); Maasch et al. ( 2005 ); Bald ( 2005 ); Scafetta & West ( 2006a , b ); Scafetta & West ( 2008a, b ); Svensmark ( 2007 ); Courtillot et al. ( 2007 , 2008 ); Singer & Avery ( 2008 ); Shaviv ( 2008 ); Scafetta ( 2009 , 2011 ); Le Mouél et al. ( 2008 , 2010 ); Kossobokov et al. ( 2010 ); Le Mouél et al. ( 2011 ); Humlum et al. ( 2011 ); Ziskin & Shaviv ( 2012 ); Solheim et al. ( 2012 ); Courtillot et al. ( 2013 ); Solheim ( 2013 ); Scafetta & Willson ( 2014 ); Harde ( 2014 ); Lüning & Vahrenholt ( 2015 , 2016 ); Bald et al. ( 2015 ); Svensmark et al. ( 2016 , 2017 ); Harde ( 2017 ); Scafetta et al. ( 2019 ); Le Mouél et al. ( 2019a , 2020a ); Mörner et al. ( 2020 ); Lüdecke et al. ( 2020 )).

Unterdessen blieben andere Rezensionen und Artikel aus diesem Zeitraum entweder unentschieden oder argumentierten für signifikante, aber subtile Auswirkungen der solaren Variabilität auf den Klimawandel. Zum Beispiel: Labitzke & van Loon ( 1988 ); van Loon & Labitzke ( 2000 ); Labitzke ( 2005 ); Beer et al. ( 2000 ); Reid ( 2000 ); Carslaw et al. ( 2002 ); Ruzmaikin & Feynman ( 2002 ); Ruzmaikin et al. ( 2004 , 2006 ); Feynman & Ruzmaikin ( 2011 ); Ruzmaikin & Feynman ( 2015 ); Salby & Callaghan ( 2000 , 2004 , 2006 ); Kirkby ( 2007 ); de Jager et al. ( 2010 ); Tinsley & Heelis ( 1993 ); Tinsley ( 2012 ); Lam & Tinsley ( 2016 ); Zhou et al. ( 2016 ); Zhang et al. ( 2020b ); Dobrica et al. ( 2009 ); Dobrica et al. ( 2010 ); Demetrescu & Dobrica ( 2014 ); Dobrica et al. ( 2018 ); Blanter et al. ( 2012 ); van Loon & Shea ( 1999 ); van Loon & Meehl ( 2011 ); van Loon et al. ( 2012 ); Roy & Haigh ( 2012 ); Roy ( 2014 , 2018 ); Roy & Kripalani ( 2019 ); Lopes et al. ( 2017 ); Pan et al. ( 2020 ).

Warum spiegelten sich diese abweichenden wissenschaftlichen Meinungen in der Literatur nicht in den verschiedenen oben zitierten IPCC-Erklärungen wider? Es gibt wahrscheinlich viele Faktoren. Ein Faktor ist wahrscheinlich die Tatsache, dass Klimawandel und solare Variabilität beides vielschichtige Konzepte sind. Daher haben, wie Pittcock ( 1983 ) feststellte, historisch gesehen viele Studien zu Sonne-Klima-Beziehungen Ergebnisse geliefert, die mehrdeutig und in beide Richtungen interpretierbar waren (Pittcock 1983 ). Ein weiterer Faktor ist, dass viele Forscher argumentieren, dass wissenschaftliche Ergebnisse, die möglicherweise mit politischen Zielen in Konflikt geraten könnten, unerwünscht seien. Lockwood ( 2012 ) argumentiert beispielsweise, dass *„Der Bereich der Sonne-Klima-Beziehungen [...] wurde in den letzten Jahren durch unwillkommenen politischen und finanziellen Einfluss korrumpiert, da Klimawandelskeptiker vermeintliche Sonneneffekte als Entschuldigung für Untätigkeit gegenüber der anthropogenen Erwärmung nutzten“* (Lockwood 2012 ).

Ein aus unserer Sicht höchst relevanter Faktor ist jedenfalls die Tatsache, dass ein vorrangiges Ziel der IPCC-Berichte darin besteht, „*mit einer Stimme für die Klimawissenschaft zu sprechen*“ (Beck et al. 2014 ; Hoppe & Rödder 2019 ). Dieses Bestreben, einen einzigen „wissenschaftlichen Konsens“ zu Themen zu präsentieren, hat dem IPCC einen bemerkenswerten internationalen „*Ruf als epistemische Autorität in Fragen der Klimapolitik*“ eingebracht (Beck et al. 2014 ). Viele Forscher haben jedoch festgestellt, dass dies durch die Unterdrückung abweichender Ansichten zu allen Themen erreicht wurde, bei denen noch wissenschaftliche Meinungsverschiedenheiten bestehen (Beck et al. 2014; Hoppe & Rödder 2019 ; van der Sluijs et al. 2010 ); Curry & Webster 2011 ; Sarewitz 2011 ; Hulme 2013 ). Infolgedessen fehlt in den IPCC-Berichten häufig eine genaue Kenntnis der Themen, bei denen es anhaltende wissenschaftliche Meinungsverschiedenheiten gibt (und warum). Dies ist für politische Entscheidungsträger, die sich auf die IPCC-Berichte verlassen, besorgniserregend, denn wie van der Sluijs et al. ( 2010 ) stellen fest: „*Der Konsensansatz beraubt politische Entscheidungsträger eines vollständigen Überblicks über die Pluralität wissenschaftlicher Meinungen innerhalb und zwischen den verschiedenen wissenschaftlichen Disziplinen, die sich mit dem Klimaproblem befassen*“ (van der Sluijs et al. 2010 ).). Aus unserer Sicht als Mitglieder der wissenschaftlichen Gemeinschaft sind wir auch besorgt darüber, dass diese Unterdrückung aufgeschlossener wissenschaftlicher Forschung den wissenschaftlichen Fortschritt bei der Verbesserung unseres Verständnisses dieser herausfordernden Themen behindern könnte.

Wir argumentieren, dass die Sonne/Klima-Debatte eines dieser Themen ist, bei dem die „Konsens“-Erklärungen des IPCC vorzeitig durch die Unterdrückung abweichender wissenschaftlicher Meinungen erreicht wurden. Tatsächlich haben van der Sluijs et al. ( 2010 ) nannte es ausdrücklich als Paradebeispiel: „*Beispiele für solche Meinungsverschiedenheiten sind Streitigkeiten über die Rolle des Menschen im Vergleich zur Rolle der Sonne bei den beobachteten und prognostizierten Klimatrends...*“ (van der Sluijs et al. 2010 ) .

Wir stimmen mit dem Argument von Sarewitz ( 2011 ) überein, dass „*die bloße Idee, dass die Wissenschaft ihre Autorität am besten durch Konsensaussagen zum Ausdruck bringt, im Widerspruch zu einem dynamischen wissenschaftlichen Unternehmen steht.*“ *Zustand des immer unvollkommenen Wissens. Die Wissenschaft würde der Politik einen größeren Wert bieten, wenn sie das breiteste Spektrum an plausiblen Interpretationen, Optionen und Perspektiven artikulieren würde, die von den besten Experten erdacht wurden, anstatt die Konvergenz zu einer angeblich einheitlichen Stimme zu erzwingen*“ (Sarewitz 2011 ) .

Die Co-Autoren dieses Artikels haben jeweils recht unterschiedliche Ansichten zur Sonne-/Klima-Debatte, und viele von uns planen, unsere Forschung zu diesem anspruchsvollen Thema auf unabhängige Weise fortzusetzen. Wir glauben jedoch, dass es an der Zeit ist, dem Rest der

wissenschaftlichen Gemeinschaft die Existenz mehrerer ungelöster Probleme mitzuteilen und die Punkte festzulegen, bei denen allgemeine Übereinstimmung besteht. Daher handelt es sich zwar nicht unbedingt um eine „empirische kontradiktorische Zusammenarbeit“, wie z. B. in Refs. (Bateman et al. 2005 ; Kahneman & Klein 2009 ; Rakow et al. 2015 ), dieser Bericht teilt in gewisser Weise die gleiche Philosophie, da wir uns darauf geeinigt haben, nicht den „konsensorientierten“ Ansatz des IPCC zu verfolgen (Beck et al. 2014 ; Hoppe & Rödder 2019; van der Sluijs et al. 2010 ; Curry & Webster 2011 ; Sarewitz 2011 ; Hulme 2013 ), sondern um hervorzuheben, wo abweichende wissenschaftliche Meinungen bestehen und wo wissenschaftliche Übereinstimmung besteht. Wie Francis Bacon im 17. Jahrhundert feststellte : „ *Wenn wir mit Gewissheiten beginnen, werden wir in Zweifeln enden; wenn wir aber mit Zweifeln beginnen und darin geduldig sind, werden wir in Gewissheiten enden.* “ Bacon ( 1605 ) ; Buch 1, S. 65.

In Abschnitt 2 werden wir einen historischen Rückblick auf die Sonne-/Klima-Debatte geben und einige der wichtigsten laufenden Debatten diskutieren. Wir werden versuchen abzuschätzen, wie viel der langfristigen Temperaturtrends der nördlichen Hemisphäre seit dem 19. Jahrhundert (oder früher) durch die solare Variabilität erklärt werden kann, indem wir eine einfache lineare Beziehung zwischen den Oberflächenlufttemperaturen der nördlichen Hemisphäre und der gesamten Sonneneinstrahlung (TSI) annehmen ). Wir werden zeigen, dass selbst diese eher einfache Hypothese noch nicht zufriedenstellend beantwortet wurde.

Das IPCC ( 2013 ) argumentierte, dass der TSI seit den 1950er Jahren zurückgegangen sei, und dies scheint einer der Hauptgründe für die Schlussfolgerung gewesen zu sein, dass die beobachtete Erwärmung seit den 1950er Jahren „äußerst wahrscheinlich“ auf vom Menschen verursachte Treibhausgase zurückzuführen sei Emissionen (IPCC 2013b ). Allerdings haben Soon et al. ( 2015 ) und Scafetta et al. ( 2019 ) haben festgestellt, dass die IPCC-Berichte ( 2013 ) nur einen kleinen Teil der in der Literatur verfügbaren TSI-Schätzungen berücksichtigt hatten und dass andere TSI-Schätzungen unterschiedliche Trends implizieren. Daher stellen wir einen umfassenderen Satz von 16 verschiedenen Schätzungen des TSI zusammen und berücksichtigen ihn. Dazu gehören die vier vom IPCC berücksichtigten Schätzungen ( 2013b.) sowie der größere Satz von acht Schätzungen, die von Soon et al. berücksichtigt wurden. ( 2015 ) und Scafetta et al. ( 2019 ). Darin ist auch die neue Schätzung enthalten, die Matthes et al. ( 2017 ) haben die Verwendung im kommenden 6. Sachstandsbericht (AR6) des IPCC empfohlen .

Abgesehen von diesen Debatten über einen direkten linearen Zusammenhang zwischen TSI und Oberflächenlufttemperaturen stellen wir fest, dass es viele Studien gibt, die argumentieren, dass die Beziehungen zwischen Sonne und Klima wahrscheinlich subtiler sind. Einige haben beispielsweise argumentiert, dass die Beziehung nichtlinear ist, z. B. Schwellenwerte beinhalten, bei denen sich

vorherrschende ozeanische oder atmosphärische Zirkulationsmuster verschieben könnten (Mörner et al. 2020; Christoforou & Hameed 1997 ; Dima & Lohmann 2009 ; Soon 2009 ). Andere weisen darauf hin, dass der solare Effekt auf das Klima aufgrund der thermischen Trägheit kurzfristig gedämpft werden sollte (Scafetta & West 2006a , b ; Scafetta & West 2008a ; Shaviv 2008 ).; Scafetta 2009 ). Andere vermuten, dass die Beziehungen zwischen Sonne und Klima in einigen geografischen Regionen stärker ausgeprägt sein könnten als in anderen (Svensmark 2007 ; Shaviv 2008 ; Lüdecke et al. 2020 ; Labitzke & van Loon 1988 ; Ruzmaikin & Feynman 2002 ; Dobrica et al. 2009 ; Dobrica et al. 2010 ; van Loon & Shea 1999 ; van Loon et al. 2012 ; Roy 2018 ; Svensmark 2019 ; Le Mouél et al. 2009). Der Einfachheit halber liegt der Schwerpunkt in diesem Dokument auf der Bewertung der relativ einfachen Hypothese einer direkten linearen Beziehung zwischen TSI und Oberflächenlufttemperaturen. Wir ermutigen die Leser jedoch, die Debatten über die Möglichkeiten subtilerer Sonne-Klima-Beziehungen weiterzuverfolgen. Vor diesem Hintergrund gehen wir in den Abschnitten 2.5 – 2.6 kurz auf einige dieser laufenden Debatten ein.

In Abschnitt 3 werden wir verschiedene Schätzungen der Temperaturtrends auf der Nordhalbkugel zusammenstellen und erstellen. Wir werden zeigen, dass die vom IPCC ( 2013b ) verwendeten Standardschätzungen , die sowohl städtische als auch ländliche Stationen umfassen, eine viel größere langfristige Erwärmung implizieren als die meisten anderen Schätzungen. Dies deutet darauf hin, dass die Standardschätzungen den Urbanisierungsbias nicht ausreichend korrigiert haben (McKittrick & Nierenberg 2010 ; Soon et al. 2015 ; Soon et al. 2018 , 2019b ; Scafetta & Ouyang 2019 ; Scafetta 2021 ; Zhang et al. 2021 ).

Unsere Hauptanalyse umfasst die Schätzung des maximalen solaren Beitrags zu den Temperaturtrends der nördlichen Hemisphäre unter der Annahme einer linearen Beziehung zwischen TSI und Temperatur. Da das IPCC ( 2013 ) jedoch zu dem Schluss kam, dass der wichtigste Faktor bei den jüngsten Temperaturtrends „anthropogene Antriebe“ (hauptsächlich durch Treibhausgasemissionen) sind, ist eine nützliche Sekundärfrage, die wir berücksichtigen werden, die Frage, inwieweit die Trends durch diese angenommene lineare Beziehung zur Sonne nicht erklärt werden können kann mit anthropogenen Kräften erklärt werden. Daher wird ein zweiter Schritt unserer Analyse darin bestehen, die statistischen Residuen aus dem ersten Schritt unter Verwendung der vom IPCC ( 2013a ) empfohlenen anthropogenen Antriebe anzupassen. In Abschnitt 4 werden wir die Datensätze des IPCC zu anthropogenen Antrieben beschreiben.

In Abschnitt 5 berechnen wir die besten Anpassungen (unter Verwendung der linearen Anpassung der kleinsten Quadrate) für jede der TSI- und Temperaturrekonstruktionen der nördlichen Hemisphäre und schätzen dann die implizite Sonne-Klima-Beziehung aus jeder Kombination zusammen mit der impliziten Rolle anthropogener (d. h , vom Menschen verursachte) Faktoren.



Abschließend werden wir in Abschnitt 6 einige abschließende Bemerkungen und Empfehlungen für zukünftige Forschungen geben. Wir betonen, dass die Hauptforschungsfragen dieser Arbeit auf den Debatten über die Rolle der Sonne beim jüngsten Klimawandel basieren. Obwohl wir dies der Rolle anthropogener Faktoren gegenüberstellen, untersuchen wir nicht explizit die mögliche Rolle anderer nicht solarbetriebener natürlicher Faktoren wie interne Veränderungen der ozeanischen und/oder atmosphärischen Zirkulation, da dies den Rahmen dieser Arbeit sprengt. Wir empfehlen jedoch weitere Forschung zu diesen möglichen Faktoren, z. B. Refs. (Wyatt & Curry 2014 ; Kravtsov et al. 2014 ; Lindzen & Choi 2011 ; Spencer & Braswell 2014 ; Mauritsen & Stevens 2015).

## 2. Schätzung der Änderungen der gesamten Sonneneinstrahlung

### 2.1. Herausforderungen bei der Schätzung multidekadischer Veränderungen der gesamten Sonneneinstrahlung

Da der größte Teil der Energie, die die Erde wärmer als den Weltraum hält, aus der einfallenden Sonnenstrahlung, also TSI, stammt, liegt es nahe, dass ein multidekadischer Anstieg des TSI zu einer globalen Erwärmung führen sollte (unter sonst gleichen Bedingungen). Ebenso dürfte ein multidekadischer Rückgang des TSI zu einer globalen Abkühlung führen. Aus diesem Grund spekulieren Forscher seit Jahrhunderten (und länger), dass Veränderungen der Sonnenaktivität ein wesentlicher Treiber des Klimawandels sein könnten (Laut 2003 ; Gray et al. 2010 ; Lockwood 2012 ; Hoyt & Schatten 1997 ; Singer & Avery 2008 ; Soon et al. 2015 ; Maunder & Maunder 1908 ; Soon & Yaskell 2003 ; Scafetta 2010 ,2014a ). Eine mit dieser Theorie verbundene herausfordernde Frage lautet jedoch: „Wie genau hat sich TSI im Laufe der Zeit verändert?“

Eine indirekte Metrik, auf die sich viele Forschungen konzentrieren, ist die Untersuchung historischer Aufzeichnungen über die Anzahl und Art/Größe von „Sonnenflecken“, die im Laufe der Zeit auf der Sonnenoberfläche beobachtet werden (Beck et al. 2014; Hoppe & Rödder 2019 ; Sarewitz 2011 ; Hulme 2013 ; Bateman et al. 2005 ; Kahneman & Klein 2009 ; Rakow et al. 2015 ; Matthes et al. 2017). Sonnenflecken sind intermittierende magnetische Phänomene im Zusammenhang mit der Photosphäre der Sonne, die als dunkle Flecken oder Flecken auf der Sonnenoberfläche erscheinen, wenn das Licht der Sonne auf eine Karte mit einem Teleskop fällt (um zu vermeiden, dass der Beobachter direkt in die Sonne blickt). Diese wurden beobachtet, seit die ersten Teleskope erfunden wurden, und Galileo Galilei und andere zeichneten bereits 1610 Sonnenflecken auf (Soon & Yaskell 2003 ; Hoyt & Schatten 1998 ; Svalgaard & Schatten 2016 ; Vaquero et al. 2016 ; Schöve 1955 ; Usoskin et al. 2015 ). Die Chinesen haben seit 165 v. Chr. sogar zeitweise schriftliche Aufzeichnungen über Sonnenflecken, die groß genug waren, um mit bloßem Auge gesehen zu werden (Wang & Li 2019 , 2020 ) Darüber hinaus zeigt eine Untersuchung der

Sonnenfleckenaufzeichnungen signifikante Veränderungen auf subdekadischen bis multidekadischen Zeitskalen. Insbesondere gibt es einen ausgeprägten „Sonnenfleckenzyklus“, bei dem die Anzahl der Sonnenflecken von Null während des Sonnenfleckenminimums auf ein Sonnenfleckenmaximum ansteigt, bei dem viele Sonnenflecken auftreten, bevor sie wieder auf das nächste Sonnenfleckenminimum abnimmt. Die Länge dieses „Sonnenfleckenzyklus“ oder „Sonnenzyklus“ beträgt typischerweise etwa 11 Jahre, kann aber zwischen 8 und 14 Jahren variieren. Dieser 11-Jahres-Zyklus des Sonnenfleckenverhaltens ist Teil eines 22-Jahres-Zyklus des magnetischen Verhaltens, der als Hale-Zyklus bekannt ist. Darüber hinaus sind bei der Sonnenfleckenanzahl multidekadische und sogar hundertjährige Trends zu beobachten. In der Zeit von 1645 bis 1715; Hoyt & Schatten 1998 ; Svalgaard & Schatten 2016 ; Vaquero et al. 2016 ; Usoskin et al. 2015 ) wurden Sonnenflecken sehr selten beobachtet.

Diese Veränderungen in der Sonnenfleckenaktivität spiegeln eindeutig einen Aspekt der Sonnenaktivität wider und liefern den Beweis dafür, dass die Sonne kein konstanter Stern ist, sondern einer, dessen Aktivität auf kurzen und langen Zeitskalen erhebliche Schwankungen aufweist. Daher scheinen die Sonnenfleckenaufzeichnungen zunächst eine spannende Informationsquelle über Veränderungen der Sonnenaktivität zu sein. Allerdings ist, wie später ausführlicher erläutert wird, immer noch unklar, wie viel von der Variabilität des TSI durch die Sonnenfleckenanzahlen erfasst wird. Die Tatsache, dass die Anzahl der Sonnenflecken **nicht** das einzige wichtige Maß für die Sonnenaktivität ist (wie viele Forscher oft implizit annehmen, z. B. Gil-Alana et al. ( 2014 ) .)) lässt sich an der einfachen Erkenntnis erkennen, dass der TSI während Sonnenfleckenminima nicht alle ~ 11 Jahre auf Null fällt, obwohl dies bei den Sonnenfleckenanzahlen der Fall ist. Tatsächlich bestätigen Satellitenmessungen, dass Sonnenflecken tatsächlich die Sonnenleuchtkraft verringern, doch paradoxerweise steigt der durchschnittliche TSI während Sonnenfleckenmaxima und nimmt während Sonnenfleckenminima ab (Willson & Hudson 1988; Lean & Foukal 1988 ; Foukal & Lean 1990 ; Willson & Hudson 1991 ).

Die aktuellen Erklärungen für den scheinbar paradoxen Zusammenhang zwischen Sonnenflecken und TSI werden wir in den Abschnitten 2.2 und 2.3 diskutieren . Auf jeden Fall wurde die Tatsache, dass die Sonnenaktivität mehr beinhaltet als nur die Anzahl der Sonnenflecken, vor mehr als einem Jahrhundert von Maunder und Maunder ( 1908 ) (nach denen das „Maunder-Minimum“ benannt ist) erkannt, die schrieben:

*„ ...denn Sonnenflecken sind nur ein Symptom der Sonnenaktivität und vielleicht nicht einmal das wichtigste Symptom “* – Maunder & Maunder ( 1908 ), S. 189-190 (Maunder & Maunder 1908 ) ;

Und,

*„Ein [,großer‘] Fleck wie der vom Februar 1892 ist an sich riesig, aber im Vergleich zur Sonne ist er ein sehr kleines Objekt; und Flecken dieser Größe kommen nicht häufig vor und dauern nur sehr kurze Zeit. Wir Ich habe daher kein Recht zu erwarten, dass eine Zeit mit vielen Sonnenflecken einen nennenswerten Rückgang des Lichts und der Wärme, die wir von der Sonne haben, bedeuten würde. Da die Oberfläche um die Flecken herum im Allgemeinen überdurchschnittlich hell ist, kann dies sogar durchaus der Fall sein sei es, dass eine Zeit mit vielen Flecken kein Abfallen bedeutet, sondern eher das Gegenteil.“ – Maunder & Maunder ( 1908 ), S. 183 (Maunder & Maunder 1908 )*

Zu Beginn des 20. <sup>Jahrhunderts</sup> erkannten Langley, Abbott und andere am Smithsonian Astrophysical Observatory (SAO), dass eine direktere Schätzung der Variabilität des TSI erforderlich war (Langley 1904 ; Abbot 1911 ; Hoyt 1979a ). Von 1902 bis 1962 führten sie eine ziemlich kontinuierliche Reihe von Messungen der „Sonnenkonstante“ durch, d. h. der durchschnittlichen Rate pro Flächeneinheit, mit der Energie bei der durchschnittlichen Entfernung der Erde von der Sonne, d ). Die Tatsache, dass sie die Sonnenkonstante explizit berücksichtigten, um den Klimawandel zu verstehen, geht aus dem Titel einer der ersten Arbeiten hervor, die dieses Projekt beschrieb, Langley ( 1904 ), nämlich *„Über eine mögliche Variation der Sonnenstrahlung und ihre wahrscheinliche Auswirkung auf die Erdtemperaturen . Sie waren sich jedoch auch der inhärenten Herausforderungen bewusst, die mit dem Versuch einhergehen, Veränderungen der Sonnenstrahlung von der Erdoberfläche abzuschätzen:*

*„Die Bestimmung der Sonnenstrahlung auf die Erde, wie sie außerhalb der Erdatmosphäre gemessen werden könnte (sogenannte „Sonnenkonstante“), wäre eine vergleichsweise einfache Aufgabe, wenn es nicht die fast unüberwindlichen Schwierigkeiten gäbe, die die tatsächliche Existenz einer solchen Konstante mit sich bringt eine Atmosphäre, über die wir uns nicht erheben können, obwohl wir versuchen könnten zu berechnen, was das Ergebnis wäre, wenn wir könnten.“ (Langley 1904 ).*

Das wahre Ausmaß dieses Problems bei der Schätzung der Änderungen des TSI aus der Tiefe der Atmosphäre wurde später im Programm deutlich. Beim Vergleich der Daten der ersten Jahre sah es zunächst so aus, als ob Änderungen im TSI in der Größenordnung von 10 % auftraten. Später stellte sich jedoch heraus, dass es zufällig zu Beginn des Programms zu größeren (in die Stratosphäre reichenden) Vulkanausbrüchen kam: am Mt. Pelée und La Soufrière (1902) und Santa Maria (1903). Daher hatten der bei diesen Eruptionen entstehende stratosphärische Staub und die Aerosole vorübergehend die Transmission der Sonnenstrahlung durch die Atmosphäre verringert (Hoyt 1979a ).

## 2.2. Die Debatte über Veränderungen der gesamten Sonneneinstrahlung während des Satellitenzeitalters (1978–heute)

Erst viel später im 20. Jahrhundert überwandten Forscher diese bodengestützte Einschränkung durch den Einsatz von Messungen auf Raketen (Johnson 1954), Ballons (Kosters & Murcay 1979) und Raumfahrzeugmessungen (Foukal et al. 1977). Als Hoyt (1979a) schließlich das gesamte rund 60 Jahre dauernde SAO-Solarkonstantenprojekt systematisch überprüfte, stellte er leider fest, dass jeder potenzielle Trend der Solarkonstanten über die Aufzeichnung hinweg wahrscheinlich geringer war als die Genauigkeit der Messungen (ca. 0,3 %). Hoyt 1979a). Mit dem Start der Satellitenmission Nimbus 7 Earth Radiation Budget (ERB) im Jahr 1978 und der Satellitenmission Active Cavity Radiometer Irradiance Monitor 1 (ACRIM1) der Solar Maximum Mission (SMM) im Jahr 1980 wurde es jedoch endlich möglich, kontinuierlich und systematisch zu überwachen der eingehende TSI über lange Zeiträume von oberhalb der Erdatmosphäre (Willson & Hudson 1988, 1991; Hoyt et al. 1992; Willson et al. 1981).

Obwohl jede Satellitenmission in der Regel TSI-Daten nur für 10 bis 15 Jahre liefert und die Daten durch allmähliche langfristige Orbitaldrifts und/oder instrumentelle Fehler beeinflusst werden können, die schwer zu identifizieren und zu quantifizieren sind (BenMoussa et al. 2013), gibt es dort Seit diesen beiden ersten US-Missionen gab es eine fast kontinuierliche Reihe von TSI-Überwachungssatellitenmissionen, darunter europäische Missionen, z. B. SOVAP/Picard (Meftah et al. 2014) und chinesische Missionen (Fang et al. 2014; Wang et al. 2017).) sowie internationale Kooperationen, z. B. VIRGO/SOHO (Fröhlich et al. 1997), und weitere US-Missionen, z. B. ACRIMSAT/ACRIM3 (Willson 2014) und SORCE/TIM (Kopp 2016).). Daher ist es im Prinzip möglich, durch Neuskalierung der Messungen verschiedener paralleler Missionen, sodass sie während der Überlappungsperioden dieselben Werte aufweisen, eine kontinuierliche Zeitreihe von TSI von den späten 1970er Jahren bis heute zu erstellen.

Daher scheint es vernünftig anzunehmen, dass wir zumindest ein einigermaßen zuverlässiges und objektives Verständnis der Veränderungen der TSI während der Satellitenzeit, also von 1978 bis heute, haben sollten. Allerdings gibt es selbst im Satellitenzeitalter erhebliche anhaltende Kontroversen darüber, was genau die Trends bei TSI waren (Scafetta 2011; Scafetta & Willson 2014; Soon et al. 2015; Scafetta et al. 2019; Beer et al. 2000; Dudok de Wit et al. 2017; Fröhlich 2012; Gueymard 2018). Es gibt eine Reihe konkurrierender zusammengesetzter Datensätze, die jeweils unterschiedliche Trends bei TSI seit den späten 1970er Jahren implizieren. Alle Kompositen stimmen darin überein, dass TSI einen etwa 11-jährigen Zyklus aufweist, der gut mit dem zuvor diskutierten Sonnenfleckenzyklus übereinstimmt. Die zusammengesetzten Daten unterscheiden sich jedoch darin, ob zusätzliche multidekadische Trends auftreten.

Die Zusammensetzung der ACRIM-Gruppe, die für die drei ACRIM-Satellitenmissionen (ACRIM1, ACRIM2 und ACRIM3) verantwortlich war, legt nahe, dass der TSI in den 1980er und 1990er Jahren allgemein zunahm, seitdem jedoch leicht zurückgegangen ist (Scafetta & Willson 2014; Scafetta et al. 2019) . ; Willson 2014 ; Scafetta & Willson 2019 ). Die Zusammensetzung des Königlichen Meteorologischen Instituts von Belgien (RMIB) impliziert, dass der TSI, abgesehen vom Sonnenfleckenzyklus, seit mindestens den 1980er Jahren ziemlich konstant geblieben ist (Dewitte & Nevens 2016) . Mittlerweile impliziert das Komposit des Physikalisch-Meteorologischen Observatoriums Davos (PMOD), dass der TSI seit mindestens den späten 1970er Jahren stetig zurückgegangen ist (Fröhlich 2012 ,2009) . Weitere TSI-Satellitenverbundwerkstoffe wurden von Scafetta ( 2011 ) erstellt; Dudok de Wit et al. ( 2017 ) und Gueymard ( 2018 ) .

Die beiden Hauptkonkurrenten von TSI-Satellitenverbundwerkstoffen sind ACRIM und PMOD. Wie wir in Abschnitt 3 diskutieren werden , stieg die globale Temperatur in den 1980er und 1990er Jahren stetig an, schien sich jedoch seit dem Ende des 20. Jahrhunderts zu verlangsamen . Daher ist die Debatte über diese drei konkurrierenden TSI-Datensätze für das Satellitenzeitalter sehr wichtig. Wenn der ACRIM-Datensatz korrekt ist, deutet dies darauf hin, dass ein Großteil der globalen Temperaturtrends während des Satellitenzeitalters auf Änderungen im TSI zurückzuführen sein könnte (Willson & Mordvinov 2003; Scafetta & West 2008b; Scafetta 2009 , 2011 ; Scafetta & Willson 2014 ; Scafetta et al. 2019 ; Willson 2014; Scafetta & Willson 2019) . Wenn der PMOD-Datensatz jedoch korrekt ist und wir der Einfachheit halber eine lineare Beziehung zwischen TSI und globalen Temperaturen annehmen, dann würden die implizierten globalen Temperaturtrends aus Änderungen des TSI eine langfristige globale Abkühlung seit mindestens den späten 1970er Jahren aufweisen. Daher impliziert der PMOD-Datensatz, dass keine der beobachteten Erwärmungen seit Ende der 1970er Jahre auf solare Variabilität zurückzuführen sein könnte und dass die Erwärmung auf andere Faktoren zurückzuführen sein muss, z. B. steigende Treibhausgaskonzentrationen. Darüber hinaus impliziert dies, dass die Änderungen der TSI die Erwärmung, die andernfalls eingetreten wäre, teilweise reduziert haben; Sollte sich dieser TSI-Trend in späteren Jahrzehnten umkehren, könnte dies die „globale Erwärmung“ beschleunigen (Fröhlich 2009 ; Fröhlich & Lean 2002) .

Der PMOD-Datensatz ist politisch vorteilhafter, um die anhaltenden erheblichen politischen und sozialen Bemühungen zur Reduzierung der Treibhausgasemissionen zu rechtfertigen, unter der Annahme, dass die seit dem späten 19. Jahrhundert beobachtete globale Erwärmung hauptsächlich auf Treibhausgase zurückzuführen ist. Tatsächlich, wie in Soon et al. ( 2015 ) gab Dr. Judith Lean (von der PMOD-Gruppe) in einem Interview aus dem Jahr 2003 zu, dass dies eine der Beweggründe für die PMOD-Gruppe war, einen Konkurrenzdatensatz zum ACRIM-Datensatz zu entwickeln, indem sie erklärte:

*„Die Tatsache, dass einige Leute Willsons [ACRIM-Datensatz]-Ergebnisse als Vorwand nutzen könnten, nichts gegen Treibhausgasemissionen zu unternehmen, ist einer der Gründe, warum wir das Gefühl hatten, wir müssten uns die Daten selbst ansehen“ – Dr. Judith Lean, Interview für das NASA Earth Observatory , August 2003 (Lindsey 2003 )*

In ähnlicher Weise argumentierte Zacharias ( 2014 ), dass es politisch wichtig sei, die Möglichkeit einer solaren Rolle bei der jüngsten globalen Erwärmung auszuschließen.

*„Eine aussagekräftige TSI-Zeitreihe ist nicht nur aus Sicht der wissenschaftlichen Gemeinschaft wünschenswert, sondern auch angesichts des steigenden Interesses der Öffentlichkeit an Fragen im Zusammenhang mit dem Klimawandel, um zu verhindern, dass Klimaskeptiker diese Diskrepanzen innerhalb der TSI-Community ausnutzen indem man beispielsweise einen vermuteten Sonneneffekt als Entschuldigung für die Untätigkeit gegenüber der anthropogenen Erwärmung anführt.“ – Zacharias ( 2014 )*

Wir wissen, dass einige Leser möglicherweise die Ansichten von Lean und Zacharias und anderen teilen und versucht sein könnten, diese politischen Argumente als Hilfe für ihre Meinungsbildung zu dieser laufenden wissenschaftlichen Debatte zu nutzen. In diesem Zusammenhang finden die Leser zahlreiche Artikel, die als offensichtliche wissenschaftliche Begründung dienen können, z. B. Refs. (Lean 2017 ; Meftah et al. 2014 ; Dudok de Wit et al. 2017 ; Fröhlich 2012 ; Dewitte & Nevens 2016 ; Fröhlich 2009 ; Fröhlich & Lean 2002 ; Zacharias 2014 ; Kopp et al. 2016 ; Lean 2018). Es kann auch erwähnenswert sein, dass das IPCC in seinem jüngsten AR5 offenbar die Seite der PMOD-Gruppe vertreten hat – siehe Abschnitt 8.4.1 des IPCC ( 2013a ) für die wichtigsten Diskussionen. Wir möchten jedoch alle Leser ermutigen, die von der ACRIM-Gruppe vorgebrachten Gegenargumente sorgfältig zu prüfen, z. B. Refs. (Willson & Mordvinov 2003 ; Scafetta & Willson 2014 ; Scafetta et al. 2019 ; Willson 2014 ; Scafetta & Willson 2019 ). Unserer Meinung nach wurde dies von den Autoren des entsprechenden Abschnitts in den einflussreichen IPCC-Berichten, also Abschnitt 8.4.1 des IPCC ( 2013a ), nicht zufriedenstellend umgesetzt. Matthes et al. ( 2017)s Empfehlung, dass ihre neue Schätzung (die weiter unten besprochen wird) der einzige Sonnenaktivitätsdatensatz sein sollte, der von den CMIP6-Modellierungsgruppen (Matthes et al. 2017) für den bevorstehenden AR6 des IPCC berücksichtigt wird, ist aufgrund der erheblichen Unterschiede zwischen ihnen noch unklarer verschiedene veröffentlichte TSI-Schätzungen. Dies gilt abgesehen von der Tatsache, dass Scafetta et al. ( 2019 ) haben argumentiert, dass die in Matthes et al. bevorzugten TSI-Proxy-Rekonstruktionen. ( 2017 ) (d. h. NRLTSI2 und SATIRE) widersprechen wichtigen Merkmalen, die bei den Satellitenmessungen ACRIM 1 und ACRIM 2 beobachtet wurden. Wir möchten die Leser auch dazu ermutigen, die weitere Diskussion dieser Debatte in Soon et al. sorgfältig zu lesen. ( 2015 ).

## 2.3. Implikationen der Satelliten-Ära-Debatte für Schätzungen vor der Satelliten-Ära

Die Debatte darüber, welcher Satellitenverbund am genauesten ist, hat auch Auswirkungen auf die Bewertung von TSI-Trends in der Zeit vor Satelliten. Insbesondere gibt es eine anhaltende Debatte darüber, wie genau die Variabilität des TSI mit der Variabilität der Sonnenfleckenaufzeichnungen übereinstimmt. Dies ist wichtig, denn wenn die Übereinstimmung sehr nahe beieinander liegt, bedeutet dies, dass die Sonnenfleckenaufzeichnungen ein verlässlicher Solar-Proxy für die Zeit vor dem Satelliten sein können (nachdem eine geeignete Skalierung und Kalibrierung durchgeführt wurde), aber wenn nicht, müssen andere Solar-Proxys dies möglicherweise tun in Betracht gezogen werden.

In den 1980er und frühen 1990er Jahren deuteten Daten der Satellitenmissionen NIMBUS7/ERB und ACRIMSAT/ACRIM1 auf eine zyklische Komponente der TSI-Variabilität hin, die stark mit dem Sonnenfleckenzyklus korrelierte. Das heißt, wenn die Anzahl der Sonnenflecken zunahm, nahm auch die TSI zu, und wenn die Anzahl der Sonnenflecken abnahm, nahm auch die TSI zu (Willson & Hudson 1988 ; Lean & Foukal 1988 ; Foukal & Lean 1990 ; Willson & Hudson 1991 ; Hoyt et al. 1992 ; Wade 1995 ). ; Willson 1997). Dies war nicht im Voraus bekannt und es war auch nicht intuitiv, da Sonnenflecken „dunkler“ sind und man daher erwarten könnte, dass mehr Sonnenflecken die Sonne „weniger hell“ machen und daher zu einem niedrigeren TSI führen würden. Tatsächlich deuten die Daten der ersten sechs Monate der Satellitenmission ACRIM1 darauf hin, dass dies der Fall sein könnte, da „*zwei starke Rückgänge der Bestrahlungsstärke von bis zu 0,2 Prozent, die etwa eine Woche andauerten, in hohem Maße mit der Entwicklung von Sonnenfleckengruppen korrelierten*“ – Willson et al. ( 1981). Zufällig scheint es jedoch, dass der Sonnenfleckenzyklus auch stark mit Veränderungen in der Anzahl der „Fakulae“ und im „magnetischen Netzwerk“ korreliert, bei denen es sich um verschiedene Arten intermittierender magnetischer Phänomene handelt, die mit Ausnahme dieser ebenfalls mit der Photosphäre der Sonne in Zusammenhang stehen. Diese Phänomene erscheinen als „helle“ Flecken und Merkmale. Es ist mittlerweile anerkannt, dass die Sonne derzeit ein „Faculae-dominiertes Stern“ ist. Das heißt, obwohl Sonnenflecken selbst den TSI zu verringern scheinen, nimmt bei steigender Sonnenfleckenanzahl tendenziell auch die Anzahl der Faculae und anderer heller Merkmale zu, wodurch sich der TSI erhöht. Das Nettoergebnis ist also ein Anstieg des TSI. Das heißt, die Zunahme der Helligkeit durch die Faculae überwiegt die Abnahme durch die Verdunkelung der Sonnenflecken (dh das Verhältnis der Faculae:Sonnenflecken-Beiträge zum TSI ist größer als 1).2007 ; Hall et al. 2009 ; Reinhold et al. 2019 ).

Auf jeden Fall ist mittlerweile allgemein bekannt, dass der TSI im Laufe des Sonnenfleckenzyklus leicht zunimmt und abnimmt, parallel zum Anstieg und Abfall der Sonnenflecken (was mit einem ungefähr parallelen Anstieg und Abfall der Faculae und magnetischen Netzwerkmerkmale

zusammenfällt) (Willson & Hudson). 1988 ; Lean & Foukal 1988 ; Foukal & Lean 1990 ; Willson & Hudson 1991 ; Hoyt et al. 1992 ; Wade 1995 ; Willson 1997 ). Viele der aktuellen TSI-Rekonstruktionen vor der Satellitenzeit basieren auf dieser Beobachtung. Das heißt, ein gängiger Ansatz zur Schätzung früherer TSI-Trends umfasst die folgenden drei Schritte:

- 1 Schätzen Sie eine Funktion zur Beschreibung der Wechselbeziehungen zwischen Sonnenflecken, Faculae und TSI während des Satellitenzeitalters.
- 2 Gehen Sie davon aus, dass diese Beziehungen zumindest in den letzten Jahrhunderten einigermaßen konstant geblieben sind.
- 3 Wenden Sie diese Beziehungen auf einen oder mehrere Sonnenfleckendatensätze an und verlängern Sie dadurch die TSI-Rekonstruktion zurück bis 1874 (für Sonnenfleckengebiete (Foukal & Lean 1990 ; Wang et al. 2005 )); 1700 (für Sonnenfleckenanzahlen (Clette et al. 2014 ; Clette & Lefèvre 2016 )); oder 1610 (für Gruppensonnenfleckenanzahlen (Hoyt & Schatten 1998 ; Svalgaard & Schatten 2016 )).

Although there are sometimes additional calculations and/or short-term solar proxies involved, this is the basic approach adopted by, e.g., Foukal & Lean (1990); Lean (2000); Solanki et al. (2000, 2002); Wang et al. (2005); Krivova et al. (2007, 2010). Soon et al. (2015) noted that this heavy reliance on the sunspot datasets seems to be a key reason for the similarities between many of the TSI reconstructions published in the literature (Soon et al. 2015).

However, does the relationship between faculae, sunspots and TSI remain fairly constant over multidecadal and even centennial timescales? Also, would the so-called "quiet" solar region remain perfectly constant despite multidecadal and secular variability observed in the sunspot and faculae cycles? Is it reasonable to assume that there are no other aspects of solar activity that contribute to variability in TSI? If the answers to all these questions are yes, then we could use the sunspot record as a proxy for TSI, scale it accordingly and extend the satellite record back to the 17<sup>th</sup> century. This would make things much simpler. It would mean that, effectively, even Galileo Galilei could have been able to determine almost as much about the changes in TSI of his time with his early 16<sup>th</sup>-century telescope as a modern (very high budget) Sun-monitoring satellite mission of today. All that he would have been missing was the appropriate scaling functions to apply to the sunspot numbers to determine TSI.



If the PMOD or similar satellite composites are correct, then it does seem that, at least for the satellite era (1978-present), the sunspot cycle is the main variability in TSI and that the relationships between faculae, sunspots and TSI have remained fairly constant. This is because the trends of the PMOD composite are highly correlated to the trends in sunspot numbers over the entire satellite record. However, while the ACRIM composite also has a component that is highly correlated to the sunspot cycle (and the faculae cycle), it implies that there are also additional multidecadal trends in the solar luminosity that are not captured by a linear relation between sunspot and faculae records. Recent modeling by Rempel (2020) is consistent with this in that his analysis suggests even a 10% change in the quiet-Sun field strength between solar cycles could lead to an additional TSI variation comparable in magnitude to that over a solar cycle (Rempel (2020)). Therefore, if the ACRIM composite is correct, then it would be necessary to consider additional proxies of solar activity that are capable of capturing these non-sunspot number-related multidecadal trends.

Over the years, several researchers have identified several time series from the records of solar observers that seem to be capturing different aspects of solar variability than the basic sunspot numbers (Hoyt & Schatten 1997, 1993; Livingston 1994; Hoyt 1979b; Friis-Christensen & Lassen 1991; Solanki & Fligge 1998; Nesme-Ribes et al. 1993; Lean et al. 1995). Examples include the average umbral/penumbral ratio of sunspots (Hoyt 1979b), the length of sunspot cycles (Solheim et al. 2012; Beer et al. 2000; Friis-Christensen & Lassen 1991; Solanki & Fligge 1998; Lassen & Friis-Christensen 1995; Soon et al. 1994; Butler 1994; Zhou et al. 1998), solar rotation rates (Nesme-Ribes et al. 1993), the "envelope" of sunspot numbers (Reid 1991; Lean et al. 1995), variability in the 10.7 cm solar microwave emissions (Labitzke & van Loon 1988; Foukal 1998a), solar plage areas (e.g., from Ca II K spectroheliograms) (Foukal 1998a,b; Foukal et al. 2009; Foukal 2012), polar faculae (Le Mouél et al. 2019a, 2020a, 2019c) and white-light faculae areas (Foukal 1993, 2015). Another related sunspot proxy that might be useful is the sunspot decay rate. Hoyt & Schatten (1993) have noted that a fast decay rate suggests an enhanced solar convection, and hence a brighter Sun, while a slower rate signifies the opposite (Hoyt & Schatten 1993). Indeed, indications suggest that the decay rate during the Maunder Minimum was very slow (Hoyt & Schatten 1993), hence implying a dimmer Sun in the mid-to-late 17<sup>th</sup> century. Owens et al. (2017) developed a reconstruction of the solar wind back to 1617 that suggests the solar wind speed was lower by a factor of two during the Maunder Minimum (Owens et al. 2017). Researchers have also considered records of various aspects of geomagnetic activity, since the Earth's magnetic field appears to be strongly influenced by solar activity (Le Mouél et al. 2019c; Duhau & Martínez 1995; Cliver et al. 1998; Richardson et al. 2002; Le Mouél et al. 2019b; Duhau & de Jager 2012).

Es gibt viele andere Solar-Proxies, die möglicherweise auch verschiedene Aspekte der langfristigen Sonnenvariabilität erfassen, siehe z. B. Livingston ( 1994 ), Soon et al. ( 2014 ) und Soon et al. ( 2015 ). Besonders hervorzuheben ist die Untersuchung kosmogener Isotopenaufzeichnungen wie  $^{14}\text{C}$  oder  $^{10}\text{Be}$  (Usoskin et al. 2009 ), da diese in mehreren der TSI-Rekonstruktionen, die wir betrachten werden, verwendet werden. Kosmogene Isotopenaufzeichnungen gelten seit den 1960er Jahren als langfristige Indikatoren für die Sonnenaktivität (Stuiver 1961 ; Suess 1965 ; Damon 1968 ; Suess 1968 ; Eddy 1977 ). Kosmogene Isotope wie  $^{14}\text{C}$  oder  $^{10}\text{Be}$  wird in der Atmosphäre durch galaktische kosmische Strahlung (GCRs) erzeugt. Wenn jedoch die Sonnenaktivität zunimmt, nimmt auch der Sonnenwind zu, der die Erde erreicht. Dies verringert tendenziell den Fluss der einfallenden kosmischen Strahlung und verringert somit die Produktionsrate dieser Isotope und ihre Menge. Diese Isotope können dann durch Photosynthese in verschiedene Langzeitaufzeichnungen eingebaut werden, beispielsweise in Baumringe. Daher ist es durch die Untersuchung der Veränderungen der relativen Konzentrationen dieser Isotope über die Zeit, beispielsweise in Baumringen, möglich, eine Schätzung der Veränderungen der durchschnittlichen Sonnenaktivität über mehrere Jahrzehnte bis hin zu Jahrhunderten und sogar Jahrtausenden zu erstellen. Da die Atmosphäre ziemlich gut gemischt ist, ändert sich die Konzentration dieser Isotope über mehrere Jahre hinweg nur langsam, sodass der 8–14-jährige Sonnenfleckenzyklus in diesen Sonnenstellvertretern teilweise reduziert werden kann. Jedoch, Stefani et al. (2020 ) fanden immer noch eine sehr gute Übereinstimmung zwischen  $^{14}\text{C}$ - oder  $^{10}\text{Be}$ -Sonnenproxys und Schove ( 1955 ) Schätzungen der Sonnenaktivitätsmaxima, die auf historischen Polarlichtbeobachtungen bis zurück ins Jahr 240 n. Chr. basierten (Stefani et al. 2020 ). Darüber hinaus können die Aufzeichnungen viel längere Zeiträume abdecken und sind daher besonders interessant für die Untersuchung multidekadischer, hundertjähriger und tausendjähriger Variabilität.

Wir stellen fest, dass mehrere Studien dazu tendierten, die Ähnlichkeiten zwischen verschiedenen Solar-Proxies hervorzuheben (Lockwood & Fröhlich 2007 ; Gray et al. 2010 ; Lockwood 2012 ; Lean 2017 ; Gueymard 2018 ; Foukal 1998a ). Wir stimmen darin überein, dass dies wichtig ist, argumentieren jedoch, dass es ebenso wichtig ist, Kontraste und Vergleiche anzustellen. Um eine Vorstellung davon zu bekommen, welche Auswirkungen die Wahl des Solar-Proxy sowie die Wahl des TSI-Satellitenverbands auf die resultierende TSI-Rekonstruktion haben können, zeichnen wir in Abbildung 1 mehrere verschiedene plausible TSI-Rekonstruktionen auf, die aus der Literatur stammen und/oder aus der Literatur übernommen wurden. Alle neun Rekonstruktionen sind im bereitgestelltErgänzende Materialien .



**Abb. 1** Beispiele für verschiedene TSI-Rekonstruktionen, die durch Variation der Wahl der Solar-Proxies für das Zeitalter vor Satelliten und der Wahl des TSI-Verbundwerkstoffs für das Satellitenzeitalter erstellt werden können. Foukal- Serien ( 2012 , 2015 ) mit PMOD wurden von <http://heliophysics.com/solardata.shtml> heruntergeladen (Zugriff am 20.06.2020). Die entsprechenden ACRIM-Reihen wurden unter Verwendung der jährlichen Mittelwerte des ACRIM-TSI-Komposits neu skaliert, das von <http://www.acrim.com/Data%20Products.htm> heruntergeladen wurde (Zugriff am 01.07.2020). Die beiden Serien Solanki & Fligge ( 1998 ) wurden ab Abb. digitalisiert. 3 dieser Arbeit (Solanki & Fligge 1998) und bis 2012 mit den aktualisierten ACRIM-Jahresmitteln verlängert. Die Hoyt & Schatten-Reihe ( 1993 ) wurde von Scafetta et al. bis 2018 aktualisiert. ( 2019 ). Die Wang et al. ( 2005 ) und Lean et al. ( 1995 ) wurden den Supplementary Materials von Soon et al. entnommen. ( 2015 ).

Foukal ( 2012 ) und Foukal ( 2015 ) verfolgten einen ähnlichen Ansatz wie Wang et al. ( 2005 ) Rekonstruktion, stützte sich jedoch auf etwas andere Solar-Proxys für die Zeit vor den Satelliten des 20. Jahrhunderts . Foukal ( 2012 ) verwendete für den Zeitraum 1947–1979 solare Mikrowellenemissionen von 10,7 cm und für den Zeitraum 1916–1946 Solarplagegebiete (aus Ca II K-Spektroheliogrammen). Foukal ( 2015 ) betrachtete die Faculae-Bereiche (aus Weißlichtbildern) für den Zeitraum 1916–1976. Im Gegensatz dazu haben Wang et al. ( 2005 ) stützte sich hauptsächlich auf die Reihen der Gruppensonnenfleckenzenzahlen für die Zeit vor dem Satelliten (nach Skalierung zur Berücksichtigung der Sonnenflecken-/Faculae-/TSI-Beziehungen während der Satellitenzeit). Diese drei verschiedenen Rekonstruktionen sind in Abbildung 1(a), (c) und (i) dargestellt . Alle drei Rekonstruktionen haben viele Gemeinsamkeiten, z. B. weisen sie alle eine sehr ausgeprägte ~11-jährige Sonnenzykluskomponente auf und sie alle implizieren einen allgemeinen Anstieg des TSI vom 19. Jahrhundert bis zur Mitte des 20. Jahrhunderts · gefolgt von einem allgemeinen Anstieg Präsentation ablehnen. Es gibt jedoch zwei wesentliche Unterschiede zwischen ihnen. Erstens haben Wang et al. ( 2005 ) Die Rekonstruktion impliziert einen etwas größeren Anstieg des TSI seit dem 19. Jahrhundert Jahrhundert bis zum 20. Jahrhundert . Während Foukal ( 2012 ) und Wang et al. ( 2005 ) implizieren, dass der maximale TSI im Jahr 1958 auftrat, die Rekonstruktion von Foukal ( 2015 ) impliziert einen relativ niedrigen TSI im Jahr 1958 und deutet auf zwei TSI-Höhepunkte im 20. Jahrhundert hin – einen in den späten 1930er Jahren und einen weiteren im Jahr 1979, also beim Start des Satelliten Epoche. Alle drei Rekonstruktionen deuten darauf hin, dass nichts von der globalen Erwärmung seit mindestens 1979 auf steigende TSI zurückzuführen sein könnte, und im Fall von Foukal ( 2012 ) und Wang et al. ( 2005 ) Rekonstruktionen, seit mindestens 1958.

Meanwhile, all three of those reconstructions were based on the PMOD satellite composite rather than the ACRIM composite. Therefore, in Figure 1(b) and (d), we have modified the Foukal (2012) and Foukal (2015) reconstructions using the ACRIM series for the 1980–2012 period instead of PMOD. We did this by rescaling the ACRIM time series to have the same mean TSI over the common period of overlap, i.e., 1980–2009.

Because the ACRIM composite implies a general increase in TSI from 1980 to 2000 followed by a general decrease to present, while the PMOD composite implies a general decrease in TSI over the entire period, this significantly alters the long-term trends. The modified version of Foukal (2012) implies that the 1958 peak in TSI was followed by an equivalent second peak in 2000. This suggests that at least some of the global warming from the 1970s to 2000 could have been due to increasing TSI, i.e., contradicting a key implication of Foukal (2012). The modified Foukal (2015) reconstruction is even more distinct. It implies that TSI reached an initial peak in the late 1930s, before declining until 1958, and then increasing to a maximum in 2000. As we will discuss in Section 3, this is broadly similar to many of the Northern Hemisphere temperature estimates. Therefore, the modified Foukal (2015) is at least consistent with the possibility of TSI as a primary driver of global temperatures over the entire 20<sup>th</sup> century.

That said, while these plausible modifications can alter the relative magnitudes and timings of the various peaks and troughs in TSI, all these reconstructions would still be what Soon et al. (2015) and Scafetta et al. (2019) refer to as "low variability" reconstructions. That is, the multidecadal trends in TSI appear to be relatively modest compared to the rising and falling over the ~ 11-year Solar Cycle component. As we will discuss in Section 2.6, many researchers have identified evidence for a significant ~ 11-year temperature variability in the climate of the mid-troposphere to stratosphere (Labitzke & van Loon 1988; van Loon & Labitzke 2000; Labitzke 2005; Salby & Callaghan 2000, 2004, 2006; van Loon & Shea 1999; Labitzke & Kunze 2012; Camp & Tung 2007b; Frame & Gray 2010; Zhou & Tung 2013; van Loon & Shea 2000; Hood & Soukharev 2012), which has been linked to the more pronounced ~ 11-year variability in incoming solar ultraviolet (UV) irradiance (Haigh 2003, 1994; Lean et al. 1997; Haigh & Blackburn 2006; Rind et al. 2008; Shindell et al. 2020; Kodera & Kuroda 2002; Hood 2003, 2016; Matthes et al. 2006). However, in terms of surface temperatures, the ~ 11-year component seems to be only of the order of 0.02-0.2° C over the course of a cycle (Shaviv 2008; White et al. 1997, 1998; Douglass & Clader 2002; Camp & Tung 2007a; Zhou & Tung 2010). Some researchers have argued that the relatively large heat capacity of the oceans could act as a "calorimeter" to integrate the incoming TSI over decadal timescales, implying that the multidecadal trends are more relevant for climate change than annual variability (Shaviv 2008; Ziskin & Shaviv 2012; Reid 2000, 1987, 1991; Soon & Legates 2013), and others have argued that these relatively small temperature variations could influence the climate indirectly through e.g.,

altering atmospheric circulation patterns (van Loon & Meehl 2011; van Loon et al. 2012; Roy 2014, 2018; Christoforou & Hameed 1997; Meehl et al. 2009). However, this observation appears to have convinced many researchers (including the IPCC reports (IPCC 2013a)) relying on "low variability" reconstructions that TSI cannot explain more than a few tenths of a ° C of the observed surface warming since the 19th century, e.g., (IPCC 2013a; Crowley 2000; Laut 2003; Haigh 2003; Damon & Laut 2004; Foukal et al. 2006; Bard & Frank 2006; Benestad & Schmidt 2009; Gray et al. 2010; Lockwood 2012; Gil-Alana et al. 2014; Lean 2017). We will discuss these competing hypotheses and ongoing debates (which several co-authors of this paper are actively involved in) in Section 2.6, as these become particularly important if the true TSI reconstruction is indeed "low variability", i.e., dominated by the ~ 11-year cycle.

On the other hand, let us consider the possibility that the true TSI reconstruction should be "high variability". In Figure 1(e)-(h), we consider four such "high variability" combinations, and we will discuss more in Section 2.4. All four of these reconstructions include a ~11-year Solar Cycle component like the "low variability" reconstructions, but they imply that this quasi-cyclical component is accompanied by substantial multidecadal trends. Typically, the ~11-year cycle mostly arises from the solar proxy components derived from the sunspot number datasets (as in the low variability reconstructions), while the multidecadal trends mostly arise from other solar proxy components.

Solanki & Fligge ( 1998 ) betrachteten zwei alternative Proxys für ihre multidekadische Komponente und behandelten die von den beiden einzelnen Komponenten beschriebene Einhüllende als eine einzelne Rekonstruktion mit Fehlerbalken. Solanki & Fligge ( 1999 ) schlugen außerdem vor, dass diese Rekonstruktion bis 1610 zurückgedehnt werden könnte, indem die Group Sunspot Number-Zeitreihe von Hoyt & Schatten ( 1998 ) als Sonnenstellvertreter für die Zeit vor 1874 verwendet wird. In Abbildung 1(e) und (f) haben wir jedoch beide Komponenten als separate Rekonstruktionen behandelt, die wir aus Abbildung 3 von Solanki & Fligge ( 1998 ) digitalisiert haben, und bis 2012 mit dem aktualisierten ACRIM-Satellitenverbund erweitert. Beide Rekonstruktionen sind recht ähnlich und deuten im Gegensatz zu den Schätzungen mit geringer Variabilität auf einen erheblichen Anstieg des TSI vom Ende des 19. Jahrhunderts bis zum Ende des 20. Jahrhunderts hin . Beide deuten auch darauf hin, dass dieser langfristige Anstieg durch einen Rückgang des TSI von einem Höhepunkt Mitte des 20. Jahrhunderts bis Mitte der 1960er Jahre unterbrochen wurde . Die Rekonstruktion unter Verwendung von Ca II K-Strandgebieten (Abb. 1e ) impliziert jedoch, dass der Höhepunkt in der Mitte des 20. Jahrhunderts im Jahr 1957 stattfand, während die Rekonstruktion unter Einbeziehung der Sonnenzykluslängen (Abb. 1f ) auf die Mitte des 20. Jahrhunderts schließen lässt. In den späten 1930er-Jahren erreichte der Höhepunkt seinen Höhepunkt, und in den 1940er-Jahren bis 1965 war der TSI rückläufig. Im Hinblick auf den Zeitpunkt des Höhepunkts

in der Mitte des 20. Jahrhunderts ist anzumerken, dass Scafetta ( 2012a ) ein Minimum im Polarlicht mittlerer Breite feststellte Frequenzen in der Mitte der 1940er Jahre, was auf eine erhöhte Sonnenaktivität hinweist (Scafetta 2012a ).

Abbildung 1(g) zeigt die aktualisierte TSI-Rekonstruktion von Hoyt & Schatten ( 1993 ). Obwohl die ursprüngliche Rekonstruktion von Hoyt & Schatten ( 1993 ) auf das Satellitenzeitalter kalibriert wurde, indem sie sich auf die von Hoyt et al. zusammengestellte NIMBUS7/ERB-Zeitreihe stützte. ( 1992 ), es wurde seitdem von Scafetta & Willson ( 2014 ) und in jüngerer Zeit von Scafetta et al. aktualisiert. ( 2019 ) unter Verwendung des ACRIM-Komposits bis 2013 und der VIRGO- und SORCE/TIM-Datensätze bis heute. Die Rekonstruktion von Hoyt & Schatten ( 1993 ) ist den beiden Rekonstruktionen von Solanki & Fligge ( 1998 ) ziemlich ähnlich, außer dass sie einen stärkeren Rückgang des TSI ab Mitte des 20. Jahrhunderts impliziert Jahrhundert bis in die 1960er Jahre, und dass der Höhepunkt in der Mitte des 20. Jahrhunderts 1947 erreicht wurde .

Wir stellen fest, dass es in der Literatur offenbar einige Missverständnisse über die Rekonstruktion von Hoyt & Schatten ( 1993 ) gibt, z. B. haben Fröhlich & Lean ( 2002 ) fälschlicherweise berichtet, dass „...Hoyt & Schatten ( 1993 ) auf der Länge des Sonnenzyklus basiert“. die anderen nutzen die *Zyklusamplitude*“ (Fröhlich & Lean 2002 ). Daher sollten wir betonen, dass Lean et al. ( 1995 ) umfasste die Rekonstruktion von Hoyt & Schatten ( 1993 ) zwar sowohl die Sonnenfleckenzahlen als auch die Einhüllende der Sonnenfleckenzahlen, aber im Gegensatz zu den meisten anderen Rekonstruktionen umfasste sie auch mehrere zusätzliche Solar-Proxys (Hoyt & Schatten 1993) ). Wir sollten auch betonen, dass es sich bei der Arbeit von Hoyt & Schatten ( 1998 ), die den weit verbreiteten Datensatz „Group Sunspot Number“ beschreibt, um eine völlig separate Analyse handelt, obwohl sie teilweise von Hoyt & Schatten ( 1993 ) motiviert wurde.

The Lean et al. ( 1995 ) Die Rekonstruktion von Abbildung 1(h) impliziert auch einen langfristigen Anstieg des TSI seit dem 19. Jahrhundert und einen anfänglichen Höhepunkt Mitte des 20. Jahrhunderts – dieses Mal im Jahr 1957, also ähnlich wie in Abbildung 1(e) . The Lean et al. ( 1995 ) basierte auf der Rekonstruktion von Foukal & Lean ( 1990 ) (Foukal & Lean 1990 ) und entwickelte sich zu Lean ( 2000 ), aus der wiederum Wang et al. ( 2005 ), aus dem sich wiederum Coddington et al. ( 2016 ) Rekonstruktion, die wir in Abschnitt 2.4 besprechen werden ist ein Hauptbestandteil der jüngsten Studie von Matthes et al. ( 2017 ) Rekonstruktion. Allerdings haben Soon et al. ( 2015 ) stellten empirisch fest (in Abb. 9 ), dass der Hauptnettoeffekt der Entwicklung von Lean et al. ( 1995 ) bis Lean ( 2000 ) bis Wang et al. ( 2005 ) bestand darin, das Ausmaß der multidekadischen Trends zu verringern, dh zu einer Rekonstruktion mit „geringer Variabilität“ überzugehen. Wir stellen fest, dass Coddington et al. ( 2016 ) und Matthes et al. ( 2017 ) hat diesen Trend fortgesetzt. Eine weitere Änderung in dieser Familie von Rekonstruktionen besteht darin, dass die neueren Rekonstruktionen

das PMOD-Satellitenkomposit anstelle von ACRIM verwendet haben (was vielleicht nicht überraschend ist, wenn man bedenkt, dass Lean, wie in Abschnitt 2.2 erwähnt, sowohl zum PMOD-Team gehörte als auch ein Co. war -Autor der gesamten Rekonstruktionsfamilie).

Therefore, a lot of the debate over whether the high or low variability reconstructions are more accurate relates to the question of whether or not there are multidecadal trends that are not captured by the ~11-year Solar Cycle described by the sunspot numbers. This overlaps somewhat with the ACRIM vs. PMOD debate since the PMOD composite implies that TSI is very highly correlated to the sunspot number records (via the correlation between sunspots and faculae over the satellite era), whereas the ACRIM composite is consistent with the possibility of additional multidecadal trends between solar cycles (Scafetta 2011; Scafetta & Willson 2014; Soon et al. 2015; Scafetta et al. 2019; Dudok de Wit et al. 2017; Fröhlich 2012; Gueymard 2018).

This has been a surprisingly challenging problem to resolve. As explained earlier, the ~11-year cyclical variations in TSI over the satellite era are clearly well correlated to the trends in the areas of faculae, plages, as well as sunspots over similar timescales (Willson & Hudson 1988; Lean & Foukal 1988; Foukal & Lean 1990; Willson & Hudson 1991; Hoyt et al. 1992; Wade 1995; Willson 1997). However, on shorter timescales, TSI is actually anti-correlated to sunspot area (Willson et al. 1981; Eddy et al. 1982). Therefore, the ~11-year rise and fall in TSI in tandem with sunspot numbers cannot be due to the sunspot numbers themselves, but appears to be a consequence of the rise and fall of sunspot numbers being commensally correlated to those of faculae and plages. However, Kuhn et al. (1988) argued that "*...solar cycle variations in the spots and faculae alone cannot account for the total [TSI] variability*" and that "*...a third component is needed to account for the total variability*" (Kuhn et al. 1988). Therefore, while some researchers have assumed, like Lean et al. (1998), that there is "*...[no] need for an additional component other than spots or faculae*" (Lean et al. 1998), Kuhn et al. (Kuhn & Libbrecht 1991; Kuhn et al. 1998, 1999; Kuhn 2004; Armstrong 2004) continued instead to argue that "*sunspots and active region faculae do not [on their own] explain the observed irradiance variations over the solar cycle*" (Kuhn 2004) and that there is probably a "*third component of the irradiance variation*" that is a "*nonfacular and nonsunspot contribution*" (Kuhn & Libbrecht 1991). Work by Li, Xu et al. is consistent with Kuhn et al.'s assessment, e.g., Refs. (Li et al. 2012, 2016; Xu et al. 2017; Li et al. 2020a), in that they have shown: that TSI variability can be decomposed into multiple frequency components (Li et al. 2012); that the relationships are different between different solar activity indices and TSI (Li et al. 2016, 2020a); and that the relationship between sunspot numbers and TSI varies between cycles (Xu et al. 2017). Indeed, in order to accurately reproduce the observed TSI variability over the two most recent

solar cycles using solar disk images from ground-based astronomical observatories, Fontenla & Landi (2018) needed to consider *nine different solar features* rather than the simple sunspot and faculae model described earlier.

In summary, there are several key debates ongoing before we can establish which TSI reconstructions are most accurate:

- 1 Which satellite composite is most accurate? In particular, is PMOD correct in implying that TSI has generally decreased over the satellite era, or is ACRIM correct in implying that TSI increased during the 1980s and 1990s before decreasing?
- 2 Is it more realistic to use a high variability or low variability reconstruction? Or, alternatively, has the TSI variability been dominated by the  $\sim 11$ -year Solar Cycle, or have there also been significant multidecadal trends between cycles?
- 3 When did the mid-20<sup>th</sup> century peak occur, and how much and for how long did TSI decline after that peak?

The answers to these questions can substantially alter our understanding of how TSI has varied over time. For instance, Velasco Herrera et al. (2015) used machine learning and four different TSI reconstructions as training sets to extrapolate forward to 2100 AD and backwards to 1000 AD (Velasco Herrera et al. 2015). The results they obtained had much in common, but also depended on whether they used PMOD or ACRIM as well as whether they used a high or low variability reconstruction. As an aside, the forecasts from each of these combinations implied a new solar minimum starting in 2002-2004 and ending in 2063-2075. If these forecasts are correct, then in addition to the potential influence on future climate change, such a deficit in solar energy during the 21<sup>st</sup> century could have serious implications for food production; health; in the use of solar-dependent resources; and more broadly could affect many human activities (Velasco Herrera et al. 2015).

## 2.4. Sixteen Different Estimates of Changes in Total Solar Irradiance since the 19<sup>th</sup> Century and Earlier

Soon et al. (2015) identified eight different TSI reconstructions (see fig. 8 in that paper) (Soon et al. 2015). Only four of these reconstructions were considered by the CMIP5 modeling groups for the hindcasts that were submitted to the IPCC AR5: Wang et al. (2005) described above, as well as Krivova et al. (2007); Steinhilber et al. (2009); and Vieira et al. (2011). Coincidentally, all four implied very little solar variability (and also a general decrease in TSI since the 1950s). However,



Soon et al. (2015) also identified another four TSI reconstructions that were at least as plausible – including the Hoyt & Schatten (1993) and Lean et al. (1995) reconstructions described above. Remarkably, all four implied much greater solar variability. These two sets are the "high solar variability" and "low solar variability" reconstructions discussed in Section 2.3 which both Soon et al. (2015) and more recently Scafetta et al. (2019) have referred to.

Since then, eight additional estimates have been proposed – four low variability and four high variability. Coddington et al. (2016) have developed a new version of the Wang et al. (2005) estimate that has reduced the solar variability even further (it relies on a sunspot/faculae model based on PMOD). Recently, Matthes et al. (2017) took the mean of the Coddington et al. (2016) estimate and the (similarly low variability) Krivova et al. (2007, 2010) estimate, and proposed this as a new estimate. Moreover, Matthes et al. (2017) recommended that their new estimate should be the only solar activity dataset considered by the CMIP6 modeling groups (Matthes et al. 2017). Clearly, Matthes et al.'s (2017) recommendation to the CMIP6 groups goes against the competing recommendation of Soon et al. (2015) to consider a more comprehensive range of TSI reconstructions.

In Figure 2, we plot the four "low solar variability" reconstructions from Soon et al. (2015) as well as these two new "low variability" estimates along with another two estimates by Dr. Leif Svalgaard (Stanford University, USA), which have not yet been described in the peer-reviewed literature but are available from Svalgaard's website [<https://leif.org/research/download-data.htm>, last accessed on 2020/03/27], and have been the subject of some discussion on internet forums.



**Fig. 2** Eight low variability estimates of TSI changes relative to the 1901–2000 average.

Recently, Egorova et al. (2018) proposed four new "high variability" estimates that built on the earlier Shapiro et al. (2011) estimate. The Shapiro et al. (2011) estimate generated some critical discussion (Schmidt et al. 2012; Judge et al. 2012; Shapiro et al. 2013) (see Sect. 2.5.4). Egorova et al. (2018) have taken this discussion into account and proposed four new estimates utilizing a modified version of the Shapiro et al. (2011) methodology. Therefore, in Figure 3, we plot the four "high solar variability" reconstructions from Soon et al. (2015) as well as these four new "high variability" estimates. This provides us with a total of 16 different TSI reconstructions. Further

details are provided in Table 1 and in the Supplementary Materials. For interested readers, we have also provided the four additional TSI reconstructions discussed in Figure 1 in the Supplementary Materials.

**Fig. 3** Eight high variability estimates of the TSI changes relative to the 1901–2000 average. Note the y-axis scales are the same as in Fig. 2.

**Table 1.** The sixteen different estimates of the changes in solar output, i.e., TSI, analyzed in this study.

IPCC AR5	Variability	Study	Start	End	20th Century mean TSI (W m <sup>-2</sup> )
Yes	Low	Wang et al. (2005)	1610	2013	1361.06
Yes	Low	Krivova et al. (2007); updated by Krivova et al. (2010)	1610	2005	1365.8
Yes	Low	Steinhilber et al. (2009)	7362 BCE	2007	1365.78
Yes	Low	Vieira et al. (2011)	1640	2007	1365.8
CMIP6	Low	Matthes et al. (2017)	1850	2015	1361.05
N/A	Low	Coddington et al. (2016)	1610	2017	1360.94
N/A	Low	Svalgaard (2014) "LASP" estimate	1700	2014	1361.05
N/A	Low	Svalgaard (2014) "SSN" estimate	1700	2014	1361.15
No	High	Hoyt & Schatten (1993); updated by Scafetta (2019)	1701	2018	1360.55
No	High	Bard et al. (2000); updated by Ammann et al. (2007)	843	1998	1366.9
No	High	Shapiro et al. (2011); adapted by Schmidt et al. (2012)	850	2009	1365.13
No	High	Lean et al. (1995)	1610	1994	1367.15

IPCC AR5	Variability	Study	Start	End	20th Century mean TSI (W m <sup>-2</sup> )
N/A	High	Egorova et al. (2018) "PHI-MC17" estimate	6000 BCE	2016	1360.20
N/A	High	Egorova et al. (2018) "PHI-US16" estimate	6000 BCE	2016	1360.43
N/A	High	Egorova et al. (2018) "PHI-MU16" estimate	16	2016	1359.67
N/A	High	Egorova et al. (2018) "SSR11" estimate	1600	2015	1360.38

## 2.5. Arguments for a Significant Role for Solar Variability in Past Climate Change

The primary focus of the new analysis in this paper (Sect. 5) is on evaluating the simple hypothesis that there is a direct linear relationship between incoming TSI and Northern Hemisphere surface air temperatures. As will be seen, even for this simple hypothesis, a remarkably wide range of answers is still plausible. However, before we discuss in Section 3 what we currently know about Northern Hemisphere surface air temperature trends since the 19<sup>th</sup> century (and earlier), it may be helpful to briefly review some of the other frameworks within which researchers have been debating potential Sun/climate relationships.

The gamut of scientific literature which encompasses the debates summarized in the following subsections (2.5 and 2.6) can be quite intimidating, especially since many of the articles cited often come to diametrically opposed conclusions that are often stated with striking certainty. With that in mind, in these two subsections, we have merely tried to summarize the main competing hypotheses in the literature, so that readers interested in one particular aspect can use this as a starting point for further research. Also, several of the co-authors on this paper have been active participants in some of the debates we will be reviewing. Hence, there is a risk that our personal assessments of these debates might be subjective. Therefore, we have especially endeavored to avoid forming definitive conclusions, although many of us have strong opinions on several of the debates we will discuss here.

Die verschiedenen Debatten, die wir in diesem Unterabschnitt ( 2.5 ) betrachten, lassen sich grob so zusammenfassen, dass sie sich mit der Frage befassen, ob Schwankungen der Sonnenaktivität in der Vergangenheit ein wesentlicher Einflussfaktor für das Klima waren. Wir betonen, dass eine positive

Antwort allein noch nicht aussagt, welche Rolle die Sonnenaktivität beim jüngsten Klimawandel gespielt hat. Beispielsweise haben mehrere Forscher argumentiert, dass die Sonnenaktivität bis vor relativ kurzer Zeit ein wichtiger Klimafaktor war, dass jedoch in den letzten Jahrzehnten anthropogene Faktoren (hauptsächlich anthropogene CO<sub>2</sub>-Emissionen) dominieren (Crowley 2000 ; Lockwood & Fröhlich 2007 ; Hegerl et al. 2007 ; Lean & Rind 2008 ; Benestad & Schmidt 2009 ; Gray et al. 2010 ; Lean 2017 ; Beer et al. 2000 ; de Jager et al. 2010 ; Lean et al. 1995 ). Andere entgegnen jedoch, dass die Sonnenaktivität, wenn sie in der Vergangenheit ein wesentlicher Klimafaktor war, plausibel ist, dass sie auch beim jüngsten Klimawandel ein wesentlicher Klimafaktor war. Wenn darüber hinaus die Rolle der Sonnenaktivität beim vergangenen Klimawandel erheblich unterschätzt wurde, dann folgt daraus, dass ihre Rolle beim jüngsten Klimawandel möglicherweise auch unterschätzt wurde (Bond et al. 2001; Scafetta & West 2006b; Svensmark 2007 ; Courtillot et al. 2007 , 2008 ; Singer & Avery 2008; Lüning & Vahrenholt 2015 , 2016 ; Mörner et al. 2020 ; Friis-Christensen & Lassen 1991 ; Lassen & Friis-Christensen 1995 ; Bald et al. 1994 ; Scafetta 2013 , 2020 ; Scafetta et al. 2016 ; Loehle & Singer 2010 ; Shaviv & Veizer 2003 ; Richter et al. 2020 ; Baliunas & Jastrow 1990 ; Zhang et al. 1994 ; Zhao et al. 2020 ).

### 2.5.1. Hinweise auf langfristige Schwankungen sowohl der Sonnenaktivität als auch des Klimas

Im Laufe der Jahre haben zahlreiche Studien über die Ähnlichkeiten zwischen den Zeitpunkten und Größen der Spitzen und Tiefpunkte verschiedener Klima-Proxy-Aufzeichnungen und gleichwertiger Solar-Proxy-Aufzeichnungen berichtet (Bond et al. 2001; Maasch et al. 2005; Courtillot et al. 2007 , 2008 ; Singer & Avery 2008 ; Lüning & Vahrenholt 2015 , 2016 ; de Jager et al. 2010 ; Friis-Christensen & Lassen 1991 ; Lassen & Friis-Christensen 1995 ; Zhou et al. 1998 ; Eddy 1977 ; Loehle & Singer 2010 ; Kerr 2001 ; Stuiver et al. 1995 , 1997 ; Neff et al. 2001 ; Jiang et al. 2015 ; Ueno et al. 2019 ; Spiridonov et al. 2019 ; Scafetta 2019 ; Steinhilber et al. 2012 ; Huang et al. 2020 ). Die meisten Klima-Proxy-Aufzeichnungen gelten als repräsentativ für das regionale Klima, weshalb diese Studien häufig dafür kritisiert werden, dass sie nur regionalisierte Trends darstellen und/oder dass es möglicherweise Probleme mit der Zuverlässigkeit der betreffenden Aufzeichnungen gibt (Bard & Frank 2006; Lockwood 2012 ; Pittock 1983 ) . ; Bard & Delaygue 2008 ) (siehe auch Abschn. 2.6.3). Andere weisen jedoch darauf hin, dass ähnliche Beziehungen an mehreren Orten auf der ganzen Welt zu finden sind (Maasch et al. 2005 ; Courtillot et al. 2008 ; Singer & Avery 2008 ; Lüning & Vahrenholt 2015 , 2016 ; Zhou et al. 1998 ; Loehle & Singer 2010 ; Scafetta 2019 ; Huang et al. 2020 ). Es wurde auch argumentiert, dass einige globale oder hemisphärische Paläotemperaturrekonstruktionen ähnliche Trends zeigen wie bestimmte solare Rekonstruktionen (Singer & Avery 2008 ; Lüning & Vahrenholt 2015 , 2016 ; Loehle & Singer 2010 ).

Diese Studien werden häufig durch zusätzliche Studien ergänzt, die weitere Beweise für erhebliche Klimaschwankungen in der Vergangenheit liefern (mit der zugrunde liegenden, aber nicht explizit überprüften Annahme, dass diese möglicherweise durch Sonnenenergie verursacht wurden) (Maasch et al. 2005; Singer & Avery 2008; Lüning & Vahrenholt 2015) . , 2016 ; Loehle & Singer 2010 ). Andere Studien liefern weitere Hinweise auf eine erhebliche solare Variabilität in der Vergangenheit (mit der zugrunde liegenden, aber nicht explizit überprüften Annahme, dass dies zu Klimaveränderungen beigetragen hat) (Dima & Lohmann 2009; Scafetta et al. 2016 ; Usoskin et al. 2007 ; Beer et al. 2018 ) .

Studien, die auf erhebliche Schwankungen der Sonnenaktivität oder des Klimas in der Vergangenheit hinweisen, liefern Belege, die mit der Vorstellung übereinstimmen, dass die Sonnenschwankungen beim vergangenen Klimawandel eine bedeutende Rolle gespielt haben. Wenn die Studie jedoch nur die Variabilität eines der beiden (Solar versus Klima) isoliert vom anderen betrachtet, dann ist dies meist qualitativer Natur.

Aus diesem Grund können „Attributions“-Studien, die versuchen, spezifische Schätzungen des vergangenen Klimawandels quantitativ mit spezifischen Rekonstruktionen der Sonnenaktivität und anderen potenziellen Klimatreibern zu vergleichen, oft als überzeugendere Argumente für oder gegen eine große Rolle der Sonne erscheinen. Tatsächlich wird diese Art der Analyse im Mittelpunkt von Abschnitt 5 stehen . In der Zwischenzeit stellen wir jedoch fest, dass die Ergebnisse dieser Attributionsstudien erheblich variieren können, je nachdem, welche Rekonstruktionen für vergangene Klimaänderungen, vergangene TSI und alle anderen berücksichtigten potenziellen Klimatreiber verwendet werden. Tatsächlich haben Stott et al. ( 2001 ) weist ausdrücklich darauf hin, dass der Betrag des <sup>20</sup>Die Erwärmung des Jahrhunderts, die sie im Hinblick auf die solare Variabilität simulieren konnten, hing davon ab, welche TSI-Rekonstruktion sie verwendeten (Stott et al. ( 2001 )).

Beispielsweise konnte die TSI-Rekonstruktion von Hoyt & Schatten ( 1993 ) „ca. 71 % der [Temperatur-]Varianz während der letzten 100 Jahre und ca. 50 % der Varianz seit 1700 erklären“ (Hoyt & Schatten 1993 ). Bald et al. ( 1996 ) bestätigte dieses Ergebnis mithilfe einer umfassenderen, auf Klimamodellen basierenden Analyse und fügte hinzu, dass sich der erklärbare Prozentsatz der langfristigen Temperaturvarianz im Zeitraum 1880–1993 von 71 erhöhte, wenn auch der Anstieg der Treibhausgase einbezogen würde % bis 92 % (Soon et al. 1996 ), obwohl Cubasch et al. ( 1997) equivalent climate model-based analysis was only able to explain about 40% of the temperature variability over the same period in terms of solar activity (Cubasch et al. 1997). More recently, Soon et al. (2015) argued that if Northern Hemisphere temperature trends are estimated relying on mostly rural stations (instead of including both urban and rural stations), then almost all

of the long-term warming since 1881 could be explained in terms of solar variability (using Scafetta & Willson (2014)'s update to 2013 of the same TSI reconstruction (Scafetta & Willson 2014)), and that adding a contribution for increasing greenhouse gases did not substantially improve the statistical fits (Soon et al. 2015).

On the other hand, considering different TSI reconstructions, a number of studies have come to the opposite conclusion, i.e., that solar variability cannot explain much (if any) of the temperature trends since the late-19<sup>th</sup> century (Crowley 2000; Lockwood & Fröhlich 2007; Hegerl et al. 2007; Lean & Rind 2008; Benestad & Schmidt 2009; Jones et al. 2013; Gil-Alana et al. 2014). For instance, Lean & Rind (2008) could only explain 10% of the temperature variability over 1889-2006 in terms of solar variability (Lean & Rind 2008), while Benestad & Schmidt (2009) could only explain  $7 \pm 1\%$  of the global warming over the 20<sup>th</sup> century in terms of solar forcing (Benestad & Schmidt 2009).

Meanwhile, other studies (again utilizing different TSI reconstructions) obtained intermediate results, suggesting that solar variability could explain about half of the global warming since the 19<sup>th</sup> century (Scafetta & West 2006a; Beer et al. 2000; Cliver et al. 1998) and earlier (Scafetta & West 2006b; Lean et al. 1995).

## 2.5.2. Similarity in frequencies of solar activity metrics and climate changes

Ein weiterer beliebter Ansatz zur Bewertung möglicher Sonne-Klima-Beziehungen besteht darin, die Frequenzanalyse zu verwenden, um Sonnenaktivitätsmetriken mit Klimaaufzeichnungen zu vergleichen und gegenüberzustellen. Der Grundgedanke dieses Ansatzes besteht darin, dass, wenn die Aufzeichnungen der Sonnenaktivität periodische oder quasi-periodische Muster aufweisen und die Klimaaufzeichnungen ähnliche Periodizitäten aufweisen, dies darauf hindeutet, dass die periodischen/quasi-periodischen Klimaveränderungen einen solaren Ursprung haben könnten. Angesichts der Tatsache, dass der Anstieg der Treibhausgaskonzentrationen seit dem 19. Jahrhundert eher kontinuierlicher Natur ist und dass die Beiträge stratosphärischer Vulkanausbrüche eher sporadischer Natur zu sein scheinen (und vorübergehender Natur – wobei die Aerosolkühlungseffekte typischerweise nur zwei bis drei Jahre anhalten) ,

Daher konzentriert sich ein Großteil der Literatur, die mögliche Beziehungen zwischen Sonne und Klima untersucht, auf die Identifizierung und den Vergleich von Periodizitäten (oder Quasi-Periodizitäten) in Klima-, Sonnenaktivitäts- und/oder geomagnetischen Aktivitätsaufzeichnungen. Beispielsweise haben Le Mouél et al. (Courtillot et al. 2013 ; Le Mouél et al. 2019a , 2020a ; Blanter et al. 2012 ; Lopes et al. 2017 ; Le Mouél et al. 2019c , c , b, 2017 , 2020b ) ; Ruzmaikin und Feynman et al. (Ruzmaikin et al. 2006 ; Feynman & Ruzmaikin 2011 ; Ruzmaikin & Feynman 2015

); Scafetta et al. (Scafetta2010 , 2014a , 2013 , 2020 ; Scafetta et al. 2016 ; Scafetta 2014b , 2018 ); White et al. (White et al. 1997 , 1998 ); Baliunas et al. ( 1997 ); Lohmann et al. ( 2004 ); Dobrica et al. (Dobrica et al. 2009 ; Dobrica et al. 2010 ; Demetrescu & Dobrica 2014 ; Dobrica et al. 2018 ); Mufti & Shah ( 2011 ); Humlum et al. (Humlum et al. 2011 ; Mörner et al. 2020 ); Laurenz, Lüdecke et al. (Lüdecke et al.2020 ; Laurenz et al. 2019 ); Pan et al. ( 2020 ); Zhao et al. ( 2020 ).

Obwohl die genauen Häufigkeiten der einzelnen Periodizitäten und ihre relative Dominanz von Datensatz zu Datensatz leicht variieren, argumentieren die Autoren, dass die Periodizitäten ähnlich genug sind (innerhalb der Unsicherheiten der Frequenzanalysen), um auf eine signifikante Rolle der solaren und/oder geomagnetischen Aktivität hinzuweisen im vergangenen Klimawandel, allerdings ohne explizite Quantifizierung des genauen Ausmaßes dieser Rolle oder der genauen Mechanismen, durch die sich dieser solare Einfluss manifestiert.

Es sollte noch einmal betont werden, dass die Identifizierung einer bedeutenden solaren Rolle beim Klimawandel in der Vergangenheit die Möglichkeit anderer Klimatreiber nicht ausschließt und daher nicht zwangsläufig bedeutet, dass der jüngste Klimawandel überwiegend solarer Natur ist.

Tatsächlich weisen die Autoren häufig ausdrücklich darauf hin, dass die relativen Beiträge solarer, anthropogener Faktoren sowie anderer natürlicher Faktoren zum jüngsten Klimawandel möglicherweise separat bewertet werden müssen (Humlum et al. 2011; Le Mouél et al. 2020a ; Scafetta 2010 , 2013 ) . ; Lohmann et al. 2004 ). Sie fügen jedoch typischerweise hinzu, dass die Rolle der Sonne wahrscheinlich größer ist als sonst angenommen (Humlum et al. 2011 ; Le Mouél et al. 2020a) . ; Scafetta 2010 , 2013 ). Insbesondere stellt Scafetta ( 2013 ) fest, dass aktuelle Klimamodelle offenbar nicht in der Lage sind, die in den globalen Temperaturschätzungen vorhandenen Periodizitäten zufriedenstellend zu simulieren, was darauf hindeutet, dass die aktuellen Klimamodelle den solaren Beitrag zum jüngsten Klimawandel erheblich unterschätzen (Scafetta 2013 ) .

Ein unmittelbarer Einwand gegen diesen Ansatz besteht jedoch darin, dass eines der auffälligsten quasiperiodischen Muster in vielen Aufzeichnungen der Sonnenaktivität der in den vorherigen Abschnitten beschriebene etwa 11-jährige Sonnenzyklus (manchmal auch „Schwabe-Zyklus“ genannt) ist Jahreszyklen sind in den meisten Klimaaufzeichnungen entweder nicht vorhanden oder bestenfalls mäßig ausgeprägt (Gil-Alana et al. 2014 ). Wir werden die verschiedenen Debatten über dieses scheinbare Paradoxon in Abschnitt 2.6 diskutieren . Mehrere Forscher haben jedoch entgegnet, dass es neben dem ~11-jährigen Schwabe-Zyklus mehrere Periodizitäten gibt, die sowohl in Sonnenaktivitäts- als auch in Klimadatensätzen vorhanden sind (Le Mouél et al. 2020a; Ruzmaikin et al. 2006; Demetrescu & Dobrica 2014 ; Pan et al . 2020; Scafetta 2010 ; Friis-Christensen & Lassen 1991 ; Le Mouél et al. 2019c ; Scafetta 2013 , 2014b ). Darüber hinaus deuten

viele Studien darauf hin, dass es tatsächlich klimatische Periodizitäten gibt, die mit dem  $\sim 11$ -Jahres-Zyklus verbunden sind (Le Mouél et al. 2020a ; Lüdecke et al. 2020 ; Ruzmaikin et al. 2006 ; Dobrica et al. 2009 ; Dobrica et al. 2010 ; Demetrescu & Dobrica 2014 ; Blanter et al. 2012 ; Roy 2014 , 2018 ; Pan et al. 2020 ; Scafetta 2010; Le Mouél et al. 2019c ; Scafetta 2013 , 2014b ; Laurenz et al. 2019 ).

A common limitation of these analyses is that the longer the period of the proposed frequency being evaluated, the longer a time series is required. The datasets with high resolution typically only cover a relatively short timescale (of the order of decades to centuries), meaning that they cannot be used for evaluating multicentennial cycles (Le Mouél et al. 2020a; Pan et al. 2020; Scafetta 2010; Le Mouél et al. 2019c), while studies examining longer paleoclimate records tend to be focused on longer periodicities (Scafetta et al. 2016; Loehle & Singer 2010), although some studies combine the analysis of long paleoclimate records with shorter instrumental records (Scafetta 2013). That said, some records can be relied on for studying both multidecadal and centennial timescales. For instance, Ruzmaikin et al. (2006) analysed annual records of the water level of the Nile River spanning the period 622-1470 AD. They found periodicities of  $\sim 88$  years and one exceeding 200 years and noted that similar timescales were present in contemporaneous auroral records, suggesting a geomagnetic/solar link (Ruzmaikin et al. 2006). Interestingly, although they also detected the 11-year cycle, it was not as pronounced as their two multidecadal/centennial cycles – this is consistent with the 11-year cycle being less climatically relevant than other cycles (Ruzmaikin et al. 2006).

Another criticism is the debate over whether the periodicities identified in each of the datasets are genuine, or merely statistical artifacts of applying frequency analysis techniques to "stochastic" data. One problem is that even with the relatively well-defined  $\sim 11$  year Schwabe cycle, the cycle is *not* strictly periodic, but quasi-periodic, i.e., the exact period for each "cycle" can vary from 8 to 14 years. Meanwhile, there are clearly non-periodic components to both climate and solar activity datasets.

Tatsächlich argumentieren einige, dass viele der scheinbaren „Periodizitäten“ in diesen Datensätzen nicht wirklich periodische Muster sind, sondern vielmehr sporadisch durch stochastische Prozesse entstehen (Hoyng 1996 ; Cameron & Schüssler 2019 ), z. B. argumentieren Cameron & Schüssler ( 2019 ), dass alle „ Periodizitäten über 11 Jahre hinaus stehen im Einklang mit „zufälligem Antrieb“ in den verschiedenen Sonnenaktivitätsdatensätzen (Cameron & Schüssler 2019 ). Andere argumentieren, dass wir keine strengen Periodizitäten, sondern eher quasiperiodische Muster erwarten sollten und daher Frequenzanalysetechniken verwenden sollten, die darauf ausgelegt sind, zwischen pseudoperiodischen Komponenten und wirklich periodischen (oder quasiperiodischen) Komponenten zu unterscheiden (Le Mouél et al . 2019a ,2020a ; Pan et al. 2020 ). Auf jeden Fall



haben in den letzten Jahren mehrere Gruppen begonnen, eine alte Hypothese zu überdenken, die, wenn sie gültig ist, echte periodische Muster der Sonnenaktivität über mehrere Jahrzehnte bis Jahrhunderte erklären könnte. Wir werden diese Hypothese in Abschnitt 2.5.3 kurz überprüfen .

### 2.5.3. Sonne-Planeten-Wechselwirkungen als plausibler Mechanismus für langfristige Sonnenvariabilität

Durch die Untersuchung der Variabilität der Sonnenfleckenzyklen in den Sonnenfleckenaufzeichnungen und offensichtlicher Ähnlichkeiten mit Schätzungen vergangener Klimaveränderungen im letzten Jahrtausend wurde Dicke ( 1978 ) zu der Frage veranlasst: „Gibt es einen Chronometer, der tief in der Sonne versteckt ist?“ (Dicke 1978). Das heißt, er fragte sich, ob die Variabilität zwischen Sonnenzyklen möglicherweise nicht „zufällig“ ist, sondern eher auf verschiedene periodische, aber langfristige Prozesse zurückzuführen ist, die zu unterschiedlichen Periodizitäten der Sonnenaktivität auf Zeitskalen führen könnten, die länger als der 11-Jahres-Zyklus sind. Wenn Dicke Recht hätte, würde dies sehr gut mit vielen der im vorherigen Abschnitt beschriebenen Studien übereinstimmen. Dies würde bedeuten, dass viele der in diesen Studien identifizierten Quasiperiodizitäten echte Periodizitäten sein könnten (nicht unbedingt linearer Natur) und nicht nur statistische Artefakte, wie ihre Kritiker argumentierten. Das würde *im Prinzip auch bedeuten*, sollte es möglich sein, die zukünftige Sonnenaktivität zuverlässig vorherzusagen und die vergangene Sonnenaktivität rückblickend zu bestimmen. Im Laufe der Jahre haben einige Forscher sogar vorgeschlagen, dass langfristige Prozesse im Inneren der Sonne auf einer ausreichend langen Zeitskala ablaufen könnten, um eine alternative Erklärung zur vorherrschenden orbitalgetriebenen Eiszeittheorie zu bieten (auf die wir in Abschnitt 2.6 kurz eingehen werden) . .5 ) (Sharma 2002 ; Ehrlich 2007 ).

Dicke Hypothese wurde von anderen bestritten, die argumentierten, dass die Variabilität der Sonnenaktivität zwischen Sonnenzyklen ausschließlich auf stochastischen Prozessen beruht, d . (Schüssler 2019 ). In den letzten Jahren haben jedoch mehrere Gruppen damit begonnen, eine alte Hypothese zur Erklärung der langfristigen Sonnenvariabilität zu überdenken, die Wolf ursprünglich Mitte des 19. Jahrhunderts vorgeschlagen hatte und die beweisen würde, dass Dicke Recht hatte (Mörner <sup>et al.</sup> 2020 ; Scafetta 2010 ). ; Stefani et al. 2020 ; Scafetta 2013 , 2020 ; Scafetta et al. 2016; Shirley et al. 1990 ; Hung 2007 ; Wilson et al. 2008 ; Wolff & Patrone 2010 ; Abreu et al. 2012 ; Cionco & Soon 2015 ; Cionco & Pavlov 2018 ; Yndestad & Solheim 2017 ; McCracken et al. 2014 ; Stefani et al. 2016 ; Scafetta et al. 2020 ; Stefani et al. 2020). Dies ist die Hypothese, dass die Gravitationseffekte der Planeten, die die Sonne umkreisen, in irgendeiner Weise (verschiedene Mechanismen wurden vorgeschlagen) mit einigen der Mechanismen interagieren können, die die Sonnenaktivität antreiben. Beachten Sie, dass wir die verwandte, aber unterschiedliche Frage des

Einflusses, den die anderen Planeten auf die Umlaufbahn der Erde um die Sonne haben (Cionco & Soon 2017 ; Fedorov 2019a ), in Abschnitt 2.6.5 diskutieren werden . Hier beziehen wir uns auf die Möglichkeit, dass die Veränderungen in den Umlaufbahnen der einzelnen Planeten im Laufe der Zeit einen Einfluss auf die Sonnenaktivität, einschließlich TSI, haben könnten.

Although these Sun-Planetary Interactions (SPI) theories can initially sound more astrological than scientific in nature, many groups have noted that many of the periodicities in solar activity (and climate) records discussed in the previous section are intriguingly similar to the periodicities with which specific planetary alignments occur. Indeed, even the ~11 year cycle might potentially be related to planetary alignments such as the 11.07-year Venus/Earth/Jupiter alignment cycle (Stefani et al. 2020, 2016; Scafetta 2012b) or harmonics associated with the interactions between Jupiter, Saturn and the Sun that have periodicities of about 10-12 years (Scafetta 2014a, 2013, 2012c).

If any of these SPI theories transpire to be valid, then it could have important implications for our understanding of past solar variability, as well as offering us the potential to predict future solar variability (Scafetta et al. 2016; Cionco & Soon 2015; Cionco & Pavlov 2018; Yndestad & Solheim 2017; Stefani et al. 2020). It could also be a powerful vindication of many of the studies described in the previous section. As a result, it is not surprising that the theories have generated significant interest in recent years. However, studies considering these theories have also generated a lot of criticism (Holm 2018; Cameron & Schüssler 2013; Cauquoin et al. 2014; Poluianov & Usoskin 2014), although these critiques have in turn been addressed (Scafetta 2014a, 2018; McCracken et al. 2014; Abreu et al. 2014).

Even among proponents of the theory, there is considerable ongoing debate over which combinations of orbitals are most relevant, e.g., if the 2100–2500 year "Bray-Hallstatt oscillation" is driven by SPI, which is more relevant: the 2318-year periodicity involving Jupiter, Saturn, Uranus and Neptune (Scafetta 2020; Scafetta et al. 2016) or the 2139-year periodicity involving just Jupiter and Saturn (Cionco & Pavlov 2018)?

At any rate, any discussion of the theory appears to be highly controversial and often moves beyond the realm of purely scientific debate <sup>1</sup>

Most of the researchers currently publishing works that are considering SPI (which includes some of us) appear to be open to the fact that the field is still somewhat speculative and ongoing, and that the theory that SPI significantly influences solar activity has not yet been satisfactorily proven. In particular, most SPI researchers explicitly acknowledge that the direct vertical tides induced on the Sun by the planets are very small (millimeters), and that a more compelling mechanism by which the planetary motions could significantly influence solar activity (including TSI) needs to be

established (Mörner et al. 2020; Scafetta 2010; Stefani et al. 2020; Scafetta 2013, 2020; Scafetta et al. 2016; Shirley et al. 1990; Wolff & Patrone 2010; Abreu et al. 2012; Cionco & Soon 2015; Cionco & Pavlov 2018; Yndestad & Solheim 2017; McCracken et al. 2014; Stefani et al. 2016; Scafetta et al. 2020). Nonetheless, several such mechanisms have now been proposed in the literature which seem plausible and worthy of further investigation (Scafetta 2020; Yndestad & Solheim 2017). For instance, perhaps the changes in the strength and spatial distribution of potential energy induced by the planetary orbits could influence solar irradiance (Wolff & Patrone 2010; Cionco & Soon 2015; Yndestad & Solheim 2017). Abreu et al. have proposed that the time-varying torque exerted by the planets on the a non-spherical tachocline could significantly influence solar activity (Abreu et al. 2012, 2014). Scafetta (2012a) has proposed that the very modest planetary tidal effects implied by classical physics might be substantially amplified in modern physics by modulating the nuclear fusion rates in the Sun and therefore, TSI. He therefore calculates that planetary tides could theoretically induce oscillating luminosity increases in TSI of between  $0.05$  and  $1.63 \text{ W m}^{-2}$ , i.e., a range consistent with the observed variations in TSI during the satellite era (Scafetta 2012b). Meanwhile, Stefani et al. have developed a solar dynamo model in which tidal synchronization amplifies the weak individual effects during "beat periods" (Stefani et al. 2020, 2016; Stefani et al. 2020). Scafetta (2020) notes that the various hypotheses should still be treated speculatively especially since often the proposed mechanisms are at least partially inconsistent with each other (Scafetta 2020). However, often the proposed mechanisms are complementary with each other, e.g., Yndestad & Solheim (2017) proposed a hypothesis that combined features of four different mechanisms (Yndestad & Solheim 2017).

#### 2.5.4. Analogies of solar variability with the variability of other "Sun-like" stars

Another approach that several researchers have taken to try and estimate the magnitude of past solar variability is by analogy with the variability of other stars that are "Sun-like" (a somewhat loose term, as will be discussed). Stellar variability does not directly tell us about the exact timings of historic solar activity trends. However, given that the Sun is itself a star, by comparing the behavior of other stars to what we know of the Sun, we can provide a better context for how we should expect the Sun to behave, including the range of variability in TSI we should expect to see over multidecadal to multi-centennial timescales. Of particular relevance for our discussion is the potential help it could provide in resolving the debate over whether the "low variability" or "high variability" TSI reconstructions (Sects. 2.3–2.4) are more reliable.

This field of studying "Sun-like stars" was largely pioneered by the astronomer, Olin Wilson (1909–1994), working at the Mount Wilson Observatory (CA, USA – the similarity in names was coincidental). To determine which stars are most Sun-like and properly compare the long-term variability of the Sun with other stars, it is important to systematically record measurements of a large sample of potentially "Sun-like stars" over as long a period as possible. Therefore, in 1966, he began a spectroscopic program of regularly recording the relative fluxes of two frequency bands in the stellar emissions from a sample of 91 main-sequence stars (Wilson 1978). The two frequency bands were those associated with the Ca II "H" and "K" emission lines, as it was known that the ratio in the emission from these two narrow (i.e., about 1 Å) bands varies with solar magnetic activity. The program became known as "the Mount Wilson HK project" and was continued by Baliunas et al. until funding ran out in 2003 (Lockwood et al. 2007; Baliunas & Jastrow 1990; Baliunas et al. 1995; Radick et al. 1998; Egeland et al. 2017). A later program consisted of a collaboration between Fairborn Observatory (AZ, USA) and Lowell Observatory (AZ, USA) to acquire Strömgren *b* and *y* photometry (a different estimate of stellar activity using very broad wavelength bands) of a large sample of stars to approximate their TSI variability (Lockwood et al. 2007; Judge et al. 2020; Radick et al. 1998, 1990; Lockwood et al. 1992; Hall & Lockwood 2004; Radick et al. 2018).

In the context of our paper, one of the first points noted from the Mount Wilson HK project as the records for each star increased to about a decade or longer was that many stars (but not all) appear to undergo cyclical variations in the combined fluxes of the H and K lines on timescales similar to those of the Sun's sunspot cycle (Baliunas & Jastrow 1990; Wilson 1978; Radick et al. 1990). For some stars, the emission fluxes seemed to be mostly constant, while for others, the fluxes seemed to be undergoing a long-term increase or decrease.

Initially, to compare these stellar measurements to those of the Sun, & examined equivalent lunar measurements of the reflected sunlight from the Moon (Wilson 1978). Others have used Ca II spectroscopic measurements from the National Solar Observatory Sacramento Peak (NM, USA) of the "Sun-as-a-star" program (White et al. 1992; Lean et al. 1992; Livingston et al. 2007). Egeland et al. (2017) recently compared both approaches and found good agreement between them (Egeland et al. 2017).

These HK measurements of "the Sun as a star" show cyclical changes that closely correspond to the rise and fall in sunspot numbers over a solar cycle (Baliunas & Jastrow 1990; Egeland et al. 2017; Lockwood et al. 1992; White et al. 1992; Lean et al. 1992; Livingston et al. 2007). Similarly, the variability in Strömgren *b* and *y* photometry also seems to capture much of the variability in TSI over a solar cycle, although surprisingly there is some controversy over whether  $(b + y)/2$  is anti-

correlated with TSI (Preminger et al. 2011; Harder et al. 2009) or correlated (Lockwood et al. 2007; Judge et al. 2020; Radick et al. 2018; Wehrli et al. 2013; Shapiro et al. 2016). The controversy appears to arise because solar observations from the Earth are from the ecliptic plane (where the amplitude of the 11-year variability in TSI is relatively low) whereas stellar observations could be from any angle (Radick et al. 2018; Wehrli et al. 2013; Shapiro et al. 2016; Nèmec et al. 2020).

At any rate, several studies have suggested that the variability of solar activity for the Sun during the satellite era has been relatively low compared with other stars (Lockwood et al. 2007; Shapiro et al. 2013; Judge et al. 2020; Baliunas & Jastrow 1990; Radick et al. 1998, 1990; Lockwood et al. 1992; Nèmec et al. 2020; Reinhold et al. 2020; Zhang et al. 2020a). This would be consistent with high solar variability reconstructions. However, other studies have argued that the low solar variability estimates are more plausible, e.g., Hall & Lockwood (2004); Judge & Saar (2007). Meanwhile, Judge et al. (2020) using an analysis of a sample of 72 Sun-like stars calculated an upper bound for the solar forcing since 1750 which was much larger than the IPCC's low variability estimate of solar variability, although the IPCC's estimate also fell within the bounds of their analysis (Judge et al. 2020). As a result, their analysis is compatible with either low or high variability reconstructions.

A major challenge with using Sun-like star data to evaluate long-term solar variability is the difference in timescales, given that we have hundreds of years of sunspot records and proxies covering millennia of solar activity, while only several decades at most for our Sun-like star data.

One approach has been to compare the ranges of the multidecadal variability in the HK and/or  $b + y$  measurements of the stellar data to the equivalent measurements for the Sun during recent decades. Many of these studies have suggested that the solar variability in recent decades has been relatively low compared with other Sun-like stars (Lockwood et al. 2007; Soon et al. 1994; Judge et al. 2012; Shapiro et al. 2013; Judge et al. 2020; Baliunas & Jastrow 1990; Zhang et al. 1994; Radick et al. 1998; Lockwood et al. 1992; Radick et al. 2018; White et al. 1992; Lean et al. 1992). This would be consistent with high solar variability reconstructions in that it would imply that the solar variability could be greater over longer timescales. However, other studies disagree and argue that the solar variability in recent decades overlaps quite well with the range of stellar variability for Sun-like stars (Hall et al. 2009; Hall & Lockwood 2004; Judge & Saar 2007; Schrijver et al. 2011). This would be consistent with the low solar variability reconstructions.

A major reason for the conflicting conclusions seems to be due to the relatively small samples of suitable stars with large amounts of data and deciding on which stars are most "Sun-like". For instance, in an early analysis of the data, Baliunas & Jastrow (1990) identified 13 stars with relatively long records that appeared to be suitable Sunlike stars. As part of their analysis, they noted that four of these stars ( $\sim 30\%$ ) were non-cycling and that these stars implied much lower activity

(Baliunas & Jastrow 1990). Later studies with larger sample sizes have suggested that "non-cycling" stars only represent 10%-15% of the Sunlike stars (Lockwood et al. 2007; Hall et al. 2009; Saar & Baliunas 1992; Saar & Testa 2012). Nonetheless, Baliunas and Jastrow speculated that maybe these "non-cycling" stars might correspond to Sun-like stars that had entered a "Maunder Minimum"-like state. Lean et al. combined this hypothesis with measurements from the "Sun-as-astar" program to estimate that the TSI during the Maunder Minimum had been 0.24% lower than present-day (White et al. 1992; Lean et al. 1992). This result was later used for calibrating the Lean et al. (1995) TSI reconstruction of Figure 3(d) (Lean et al. 1995).

However, since then, several studies have suggested that identifying Sun-like stars in "Maunder Minimum"-like states is probably more challenging (Hall & Lockwood 2004; Judge & Saar 2007; Saar & Testa 2012; Wright 2004; Shah et al. 2018). Hall & Lockwood (2004) found that 17% of a larger sample of 57 Sun-like stars were "non-cycling", but the distribution of stellar activities was not as neatly divided as Baliunas and Jastrow's original sample. While some have argued that this is an argument in favor of the low-variability reconstructions, e.g., Schmidt et al. (2012), others have noted that we still do not know whether these "non-cycling" stars were genuinely in a Maunder Minimum state, rather than being not as Sun-like as assumed (Saar & Testa 2012; Wright 2004). Therefore, there is some interest (Judge & Saar 2007; Shah et al. 2018) in using more nuanced methods for identifying genuinely Sun-like stars that are currently in a Maunder Minimum-like state than Baliunas and Jastrow's simple first approximation of dividing stars into "cycling" or "non-cycling".

If Sun-like star monitoring programs like the early Mount Wilson, Lowell and Fairborn Observatory programs could be expanded to include a larger sample of potential Sun-like stars (ideally a minimum of several hundred candidates), and these programs were continued for multiple decades, then it is plausible that we could identify samples of Sun-like stars *transitioning* from a cycling state to a non-cycling state (or vice versa).

In the meantime, other studies have taken different independent approaches to relying on Sun-like star data to distinguish between high and low-variability reconstructions. For instance, Zhang et al. (1994) estimated the relationship between stellar brightness (analogous to TSI) and stellar magnetic activity (analogous to sunspot/faculae activity) by comparing the HK and  $b+y$  measurements (Zhang et al. 1994). Importantly, they found a reasonably linear relationship. By extrapolating this relationship to zero magnetic activity, and assuming that this was similar to the Maunder Minimum, they calculated that TSI had probably increased by something between 0.2% and 0.6% since the Maunder Minimum. This would be consistent with the high variability reconstructions. Soon et al.

(1994) also noted that, like solar activity, the stellar activity of cyclic stars seemed to be inversely proportional to the cycle length, and this offered another metric for comparing solar activity to that of the Sun-like stars (Soon et al. 1994).

More recently, controversy over the high solar variability in the TSI reconstruction of Shapiro et al. (2011) in Figure 3(c) has led to some interesting comparisons with the Sun-like star data (Egorova et al. 2018; Judge et al. 2012; Shapiro et al. 2013). Judge et al. (2012) argued that the model "A" for the irradiance from the quiet Sun's photosphere utilized for generating the Shapiro et al. (2011) reconstruction led to certain unrealistic results, and that using a replacement "model B" reduced the variability of the reconstruction by a factor of two (Judge et al. 2012). This would still make the reconstruction a high variability reconstruction, but obviously less high. However, they also noted that when they split the original reconstruction into a series of 15 year segments (for comparison with the various 10–20 year stellar records), the distribution of trends was actually quite consistent with that implied by the Sun-like star data (Judge et al. 2012). This was later confirmed by Shapiro et al. (2013) and Judge et al. (2020), suggesting that perhaps the high variability implied by the original reconstruction was coincidentally correct. Egorova et al. (2018) developed an equivalent "model B" that was able to replicate the results of Judge et al. (2012), but they noted that by varying the choice of which solar modulation potential dataset to use, they could get four different TSI reconstructions – Figure 3(e)-(h). Coincidentally, one of these ("PHI-MU16") implied a similar difference between the Maunder Minimum and present to the original Shapiro et al. (2011) reconstruction (Egorova et al. 2018), suggesting a possible explanation for the apparent contradictions between the two separate analyses of Judge et al. (2012). On the other hand, Yeo et al. (2020) disputes whether any of the models of the quiet solar photosphere considered by Shapiro et al. (2011), Judge et al. (2012) or Egorova et al. (2018) are reliable and argues for a different model which implies a rather modest difference between the Maunder Minimum and present (Yeo et al. 2020). Although, Rempel (2020) clarifies that Yeo et al.'s model does not completely rule out the high TSI changes implied by these reconstructions, but rather suggests that they would "*require substantial changes in the quiet-Sun field strength (about a 50% reduction)*" between the Maunder Minimum and present (Rempel 2020).

Unfortunately, carrying out multidecadal monitoring of a large sample of Sun-like stars requires considerable effort and resources, and many of these projects have been discontinued due to lack of funding. However, some recent projects such as the Kepler space mission (2009–2013) or the Chinese ground-based Large Sky Area Multi-Object Fiber Spectroscopic Telescope (LAMOST) surveys (2012–present) have provided important additional data for the short-term variability of Sun-like stars (Nèmec et al. 2020; Reinhold et al. 2020; Zhang et al. 2020a; Basri et al. 2013; Montet et al. 2017; Reinhold et al. 2017; Salabert et al. 2016). The relatively short observational

timespans of these projects mean that they cannot be used for studying the multidecadal variability. However, the data can be relied on for comparing the short-term variability of the Sun to other stars on timescales less than a few years (Nèmec et al. 2020; Reinhold et al. 2020; Zhang et al. 2020a; Basri et al. 2013; Montet et al. 2017; Reinhold et al. 2017; Salabert et al. 2016). Additionally, the data can improve our understanding of the relationships between the faculae:starspot ratios which we discussed in Section 2.1-2.3. E.g., why are some stars "facula-dominated" (like the Sun is currently) and others "spot-dominated" (Reinhold et al. 2019; Shapiro et al. 2016; Montet et al. 2017; Metcalfe et al. 2016)?

## 2.6. The Apparent Paradoxes from the 11 Year "Schwabe" Quasi-cyclical Component

If you consider all of the TSI reconstructions among the "low variability estimates" (Fig. 2), except for the Steinhilber et al. (2009) reconstruction which is based on cosmogenic isotope proxies, it could appear that the most significant feature is the short-term maximum-minimum sunspot cycle fluctuations which occur with a roughly-11 year period (i.e., the "Schwabe cycle"). Therefore, initially, it might be supposed that the influence of solar variability on the Earth's climate should be most obvious over the course of each sunspot cycle. This applies even more so if you treat the raw Sunspot Number (SSN) record as a proxy for TSI, since the SSN falls to zero during every cycle (Gil-Alana et al. 2014).

This has been a puzzle for the community since the beginning of modern research into possible Sun/climate connections, since the fluctuations in global surface air temperature (for instance) over a sunspot cycle are relatively small at best (Gray et al. 2010; Scafetta 2009), and often quite ambiguous (Pittock 1983).

Typically, the peak-to-trough variability in global surface air temperatures over a sunspot cycle is estimated empirically at about  $0.1^{\circ}\text{C}$  (Gray et al. 2010; Scafetta 2009), although Scafetta (2009) notes that the estimates of this "11-year solar cycle signature" in the literature vary from about  $0.05^{\circ}\text{C}$  to about  $0.2^{\circ}\text{C}$  (Scafetta 2009). He also notes that typical climate models are unable to simulate even this modest temperature variability over a solar cycle, with some climate models predicting the solar cycle signature to be as low as  $0.02 - 0.04^{\circ}\text{C}$  (Scafetta 2009). Partly on this basis, he suggests that there are "*...reasons to believe that traditional climate models cannot faithfully reconstruct the solar signature on climate and are significantly underestimating it*" (Scafetta 2009).

In any case, if you assume that (a) the low variability TSI estimates are more reliable than the high-variability estimates, and (b) there is a linear relationship between TSI and global (or hemispheric) surface air temperatures, these relatively low 11-year Solar Cycle signature estimates would initially



appear to put a very modest upper bound on the maximum contribution of solar variability to the Northern Hemisphere surface temperature trends since the 19<sup>th</sup> century. In Section 5, we will compare and contrast the linear fits using the high and low-variability TSI estimates, i.e., we will be implicitly evaluating the first assumption. However, there is also a considerable body of literature critically evaluating the second assumption from several different avenues. Therefore, in this section, we will briefly review some of the main attempts to resolve this apparent "11-year paradox".

The apparent paradox could indicate that the Sun affects the climate by other covarying aspects of solar variability (changes in the UV component, GCR fluxes, etc.) rather than just TSI changes. Indeed, much of the literature over the last few decades has suggested that we should not be only looking for a *direct* linear relationship between TSI and global surface air temperatures, but rather considering the possibility of more indirect and/or subtle Sun/climate relationships. Some of the main hypotheses are summarized schematically in Figure 4.

**Fig. 4** Schematische Darstellung der vorgeschlagenen Aktionsbereiche für drei unterschiedliche Sätze aktueller Hypothesen darüber, wie die Sonne indirekt das Klima der Erde beeinflusst. Typ (a) stellt fest, dass es im UV-Bereich der einfallenden Sonnenstrahlung eine größere Variabilität gibt, diese jedoch größtenteils in der Stratosphäre absorbiert wird. Daher wird argumentiert, dass die Hauptbeziehungen zwischen Sonne und Klima ihren Ursprung in der Stratosphäre haben, sich aber möglicherweise von oben nach unten in die Troposphäre und an die Oberfläche ausbreiten. Typ (b) legt nahe, dass es durch Schwankungen des TSI direkte Auswirkungen auf die Troposphäre gibt, diese jedoch entweder subtil sind (z. B. durch Änderungen in den Zirkulationsmustern) oder eine Erwärmung der Ozeane beinhalten, die dann indirekt das troposphärische Klima verändert („Boden- hoch“).

### 2.6.1. „Top-down“- vs. „Bottom-up“-Mechanismen

Als an der Oberfläche lebende Art interessiert uns vor allem das Klima auf oder in Bodennähe, z. B. die Lufttemperatur an der Oberfläche. Darüber hinaus beschreiben die meisten unserer Klimaaufzeichnungen in ähnlicher Weise das Klima an oder in der Nähe der Oberfläche. Wie Dines (1919) jedoch zu Beginn des 20. Jahrhunderts anhand der Analyse früher Wetterballonmessungen feststellte (Dines 1919), hängen die Schwankungen der Temperaturen und Drücke an der Oberfläche in gewisser Weise mit denen in der Troposphäre und Stratosphäre zusammen.

Tatsächlich korreliert die Temperaturvariabilität in der gesamten Troposphäre teilweise mit der an der Oberfläche und Grenzschicht und teilweise antikorreliert mit der in der Stratosphäre (Wu et al. 2006). Vor diesem Hintergrund haben mehrere Forscher, die nach Zusammenhängen zwischen Sonne und Klima suchen, potenzielle „Top-Down“-Mechanismen identifiziert, durch die sich eine relativ starke ~11-jährige Signatur des Sonnenzyklus in der Stratosphäre wiederum nach unten ausbreiten und das Oberflächenklima indirekt beeinflussen könnte – vielleicht auf subtile und nuancierte Weise könnte das das scheinbare „11-Jahres-Paradoxon“ erklären.

Insbesondere Labitzke & van Loon (1988) stellte interessante Korrelationen zwischen den Wintertemperaturen der nördlichen Hemisphäre (und auch den geopotentialen Höhen bei bestimmten atmosphärischen Druckniveaus) und dem 11-jährigen Sonnenzyklus in der Stratosphäre, insbesondere in den Polarregionen, fest. Sie fanden heraus, dass diese Korrelationen am deutlichsten waren, wenn sie die Daten in zwei Hälften aufteilten, je nachdem, ob sich der Wind der sogenannten „Quasi-Biennial-Oszillation“ (QBO) in seiner Westphase oder Ostphase befand. Beim QBO handelt es sich um ein stratosphärisches Zirkulationsmuster, bei dem die vorherrschenden stratosphärischen Winde in der Nähe des Äquators etwa alle zwei Jahre von überwiegend westlich zu überwiegend östlich zu wechseln scheinen. Spätere Arbeiten dieser Gruppe weiteten diese Beziehungen auf die Tropen aus. (2005; Labitzke & Kunze 2012).

Obwohl einige der von Labitzke et al. scheinen teilweise auch in der Troposphäre vorhanden zu sein, die Beziehungen scheinen in der Stratosphäre am ausgeprägtesten zu sein. In diesem Zusammenhang stellten mehrere Forscher fest, dass der Großteil der UV-Komponente der einfallenden Sonnenstrahlung in der Stratosphäre absorbiert wird und die Variabilität dieser UV-Komponente über den 11-Jahres-Zyklus viel größer zu sein scheint als bei TSI (Haigh 1994; Lean et al. 1997; Haigh & Blackburn 2006; Harder et al. 2009; Lean & DeLand 2012). Dies hat zu einem der wichtigsten Sätze aktueller Hypothesen für eine indirekte Beziehung zwischen Sonne und Klima geführt – schematisch dargestellt in Abbildung 4(a).. Das heißt, es wird argumentiert, dass die ursprünglich von Labitzke et al. und von anderen aufgebaut (Salby & Callaghan 2000; Frame & Gray 2010; van Loon & Shea 2000; Kodera & Kuroda 2002; Hood 2003, 2016; Matthes et al. 2006) werden in gewisser Weise durch UV-Strahlung angetrieben und haben daher ihren Ursprung in der Stratosphäre und nicht in der Troposphäre (Salby & Callaghan 2000; Frame & Gray 2010; Haigh 1994; Haigh & Blackburn 2006; Kodera & Kuroda 2002; Hood 2003, 2016); Matthes et al. 2006).

*Diese „Top-Down“-Mechanismen implizieren, dass die in der Troposphäre oder an der Oberfläche identifizierten Sonne-Klima-Beziehungen indirekt durch die Kopplung von Stratosphäre und Troposphäre erfolgen. Aus dieser Perspektive besteht eine Lösung für das scheinbare 11-Jahres-*

Paradoxon darin, dass es zwar Beziehungen zwischen Sonne und Klima gibt, diese jedoch größtenteils auf die Stratosphäre beschränkt sind und zu dem Zeitpunkt, an dem das „Sonnensignal“ die Oberfläche erreicht hat, nur ein bescheidenes Signal vorhanden sind Überreste. Tatsächlich simulieren Klimamodelle, die versuchen, diese „Top-Down“-Mechanismen zu integrieren, im Allgemeinen ein relativ kleines und diffuses „Sonnensignal“ auf Oberflächenebene (Haigh 1994 ; Haigh & Blackburn 2006 ; Rind et al. 2008 ; Shindell et al. 2020 ; Matthes et al.).

Modellsimulationen von Haigh & Blackburn ( 2006 ) legen beispielsweise nahe, dass die Sonnenerwärmung durch erhöhte UV-Strahlung mindestens 50 Tage brauchte, um die Stratosphäre zu erwärmen, aber bis zu 500 Tage, um die Troposphäre zu erreichen (Haigh & Blackburn 2006 ). Einige Studien haben Sonnensignale in der Troposphäre gefunden, argumentierten jedoch, dass sie weniger ausgeprägt sind als in der Stratosphäre , d . Haube 2016 ).

Allerdings haben *auch* andere Studien Hinweise auf ein starkes Sonnensignal für Temperaturschwankungen innerhalb der Troposphäre gefunden (Soon et al. 2000a ; Salby & Callaghan 2006 ; Dobrica et al. 2018 ; van Loon & Shea 1999 ; Gleisner & Thejll 2003 ). Insbesondere Soon et al. ( 2000a ) stellten interessante Korrelationen zwischen einem bestimmten Maß der Sonnenaktivität (der von koronalen Löchern bedeckten Fläche der Sonne) und den Lufttemperaturen in der unteren Troposphäre (wie aus Satellitenmessungen abgeleitet) fest (Soon et al. 2000a ) . Ihre Ergebnisse legen nahe, dass *die meiste* Temperaturvariabilität in der unteren Troposphäre (zumindest im Satellitenzeitalter) könnte durch solare Variabilität, vulkanische Aktivität und El Niño/La Niña-Perioden erklärt werden (Soon et al. 2000a ) . Wie aus dem Schema in Abbildung 4 ersichtlich ist , umfasst die untere Troposphäre nominell die Oberfläche. Daher sind die Ergebnisse von Soon et al. ( 2000a ) scheint *zunächst* dem offensichtlichen 11-Jahres-Paradoxon zu widersprechen (Soon et al. 2000a ). Allerdings stellen wir hier eine zusätzliche Nuance fest, da die satellitengestützten Schätzungen der Temperaturtrends in der „unteren Troposphäre“ meist die Temperaturen *oberhalb der Grenzschicht beschreiben*, also oberhalb der ersten paar Kilometer. Laufende Arbeiten einiger von uns (RC, MC und WS) legen nahe, dass die Temperaturvariabilität innerhalb der Regionen der Troposphäre, die sich über der Grenzschicht befinden, enger mit der der Stratosphäre zusammenhängt als innerhalb der untersten Teile der Troposphäre, die dieser am nächsten liegen Oberfläche. Vor diesem Hintergrund schlagen wir vor, dass zukünftige Untersuchungen zu möglichen Beziehungen zwischen Sonne und Klima unter Berücksichtigung der Troposphäre zwischen dem Grenzschichtteil der Troposphäre und der troposphärischen Region oberhalb der Grenzschicht unterscheiden sollten (und den „Tropopausen“-Übergang zwischen der Troposphäre separat berücksichtigen sollten). und Stratosphäre).

Meanwhile, others have argued for a more nuanced solar signal at the surface/within the troposphere, whereby solar variability directly influences the surface and tropospheric climate, but in more subtle ways that become amplified via positive feedbacks and/or changes in oceanic or atmospheric circulation patterns (Zhou & Tung 2013; Camp & Tung 2007a). For instance, van Loon et al. have argued for solar signals that alter circulation patterns associated with, in turn: Hadley and Walker circulations (Meehl et al. 2009; van Loon et al. 2004); El Niño Southern Oscillation (ENSO) (van Loon & Meehl 2011; Meehl et al. 2009; van Loon & Meehl 2008) and the North Atlantic Oscillation (NAO) (van Loon et al. 2012). Changes in these circulation patterns themselves could alter regional and even hemispheric surface temperatures. Similarly, Ruzmaikin et al. found evidence for a solar signal in the North Annular Mode (NAM), which in turn appears to influence Northern Hemisphere surface temperatures (Ruzmaikin & Feynman 2002; Ruzmaikin et al. 2004). Many other relationships along these lines have now been proposed (Christoforou & Hameed 1997; Roy & Haigh 2010; Misios & Schmidt 2012; Zhou et al. 2013; Roy et al. 2016; Roy 2018).

Thereby, these "bottom-up" mechanisms – Figure 4(b) – offer an alternative solution to the apparent 11-year paradox, in which the 11-year cycle only has a modest direct influence on surface temperatures but also indirectly influences the climate (perhaps on multidecadal timescales) by altering prevailing circulation patterns – especially those associated with key "centers of action" (Christoforou & Hameed 1997).

In terms of Sun/climate relationships at the surface, some researchers have argued that it is difficult to establish whether the "top-down" or "bottom-up" mechanisms are more important (Salby & Callaghan 2006; Camp & Tung 2007b; Zhou & Tung 2013). Others have suggested that both sets of mechanisms are important (Roy 2014, 2018; Roy & Kripalani 2019; Dima & Voiculescu 2016), with Roy et al. proposing that a complex series of interconnected mechanisms from both sets could be involved (Roy 2014, 2018; Roy & Kripalani 2019). Meanwhile, Dima & Voiculescu (2016) suggest that both the "top-down" and "bottom-up" mechanisms might also combine with a third mechanism involving solar-driven variability in cloud cover (Dima & Voiculescu 2016). They suggest this could be driven by one of the proposed GCR mechanisms, which we will discuss in Section 2.6.4. In that case, their Sun/climate relationships would involve all three of the sets of mechanisms described in Figure 4.

### 2.6.2. "The ocean as a buffer": Ocean heat capacity as a "filter capacitor"–based buffering mechanism

Reid (2000, 1987, 1991) noticed that the global Sea Surface Temperature (SST) time series was intriguingly similar to the multidecadal trends of the SSN record once the 11-year cycle had been removed by either smoothing both series with an 11-year running mean (Reid 1987) or by using the

"envelope" of the SSN record, i.e., the time series generated by connecting the maxima from each solar cycle (Reid 1991). He argued that variability in TSI was influencing ocean temperatures on multidecadal timescales *but* not as much over the 11-year cycle due to the relatively short time frame and the fact that it was (quasi)-cyclical: "*Die zyklische Natur des solaren Antriebs [11-Jahres-Zyklus] verringert jedoch seine Auswirkungen auf das Klima erheblich, da die thermische Trägheit des Ozeans groß genug ist, um einen 11-Jahres-Zyklus erheblich zu dämpfen*" – Reid ( 2000 ) .

Daher bestand Reids Lösung für das oben beschriebene offensichtliche „11-Jahres-Paradoxon“ darin, dass die Wärmekapazität der Ozeane effektiv als Puffer fungiert, der einen Großteil der kurzfristigen zyklischen Sonnenvariabilität der eingehenden TSI über den 11-Jahres-Zyklus herausfiltert erfasst aber einen Großteil der längeren multidekadischen bis hundertjährigen Trends und Zyklen in TSI. Wenn die Meerestemperaturen auf diesen längeren Zeitskalen durch solare Variabilität beeinflusst werden, könnte dies wiederum ozeanische und/oder atmosphärische Zirkulationsmuster beeinflussen, die wiederum die Landoberflächentemperaturen beeinflussen könnten.

Wenn diese Hypothese gültig ist, würde dies bedeuten, dass wir die TSI-Variabilität auf mehreren Zeitskalen separat berücksichtigen müssen (im Einklang mit den Analysetypen in den Abschnitten 2.5.2 und 2.5.3 ) (Scafetta 2009 ). Tatsächlich haben Dima und Lohmann ( 2009 ) vorgeschlagen, dass die solare Variabilität auf tausendjährigen Zeitskalen mit der Variabilität ozeanischer thermohaliner Zirkulationen kombiniert werden könnte, um „ *einen möglichen kombinierten solar-thermohalinen Zirkulationsursprung für den ~1.500-jährigen [Klimawandel-]Zyklus*“ zu schaffen (Dima & Lohmann (2009) Lohmann 2009 ). Soon und Legates haben einen analogen solaren/thermohalinen Mechanismus vorgeschlagen, der auch auf Zeitskalen von mehreren Jahrzehnten bis Hundertjahren funktionieren könnte (Soon 2009) .; Soon & Legates 2013 ).

White et al. ( 1997 , 1998 ) versuchten, eine solche Bewertung des Einflusses der TSI-Variabilität auf die Meerestemperaturen vorzunehmen und stützten sich dabei auf Lean et al. ( 1995 ) TSI-Rekonstruktion von Abbildung 3(d) . White et al. ( 1997 ) verwendeten einen SST-Datensatz für den Zeitraum 1900–1991 und einen Datensatz zum Temperaturprofil des oberen Ozeans für den Zeitraum 1955–1994 (White et al. 1997 ). In einer zweiten Arbeit haben White et al. ( 1998 ) wiederholten die Analyse unter Verwendung einer Zeitreihe der tiefengewichteten Durchschnittstemperaturen (DVT) der oberen Ozeane für den Zeitraum 1955–1996 (White et al. 1998) .). Beide Studien ergaben, dass der solare Einfluss auf die Meerestemperaturen auf dekadischen Zeitskalen (9–13 Jahre) anders war als auf interdekadischen Zeitskalen (18–25 Jahre) und für den längeren Datensatz im ersten Artikel, wahrscheinlich multidekadische bis hundertjährige Skalen (obwohl der Datensatz war nur 92 Jahre lang). Im Prinzip steht dies im Einklang mit Reids

Hypothese, dass die solaren Einflüsse auf die Meerestemperaturen auf verschiedenen Zeitskalen unterschiedlich sind. Tatsächlich kam die erste Arbeit zu dem Schluss, dass die solare Variabilität zwischen 0,2 und 0,3 °C (d. h. 50 % bis 75 %) der damals aufgetretenen globalen SST-Erwärmung von 0,4 °C im vorangegangenen Jahrhundert erklären könnte, d. h. sie stimmt weitgehend mit dieser Aussage überein Reid. Im zweiten Artikel stellten sie jedoch klar, dass der langfristige Anstieg des TSI in den letzten Jahrzehnten, der von Lean et al. ( 1995) Die TSI-Rekonstruktion reichte nicht aus, um die Erwärmungsrate zu erklären, und argumentierte, dass eine Treibhausgaskomponente erforderlich sei. Wir stellen fest, dass Lean Co-Autor von White et al. Papiere.

In jüngerer Zeit hat Scafetta ( 2009 ) empirisch argumentiert, dass die globalen Temperaturtrendschätzungen der letzten 400 Jahre im Hinblick auf die solare Variabilität am besten passen, indem angenommen wird, dass der solare Antrieb aufgrund von Änderungen im TSI sowohl schnell (weniger als 0,5 Jahre) als auch langsamer wirkt , multidekadische Zeitskalen (Scafetta 2009 ). Obwohl diese Analyse empirischer Natur war und daher keinen definitiven Mechanismus für die Ursache postulierte, stünde dies auch im Einklang mit dem oben beschriebenen Mechanismus „Ozean als Puffer“. Tatsächlich unterteilen viele Energiebilanz-Klimamodelle (EBMs) die Ozeane in zwei oder mehr Schichten mit unterschiedlichen Zeitskalen in jeder Schicht, um diesen Puffermechanismus explizit zu modellieren, z. B. Lindzen & Giannitsis (1998 ) ; Held et al. ( 2010); Ziskin & Shaviv ( 2012 ); Geoffroy et al. ( 2013 ); Rohrschneider et al. ( 2019 ). Darüber hinaus haben Wang et al. ( 2020 ) legen nahe, dass die Beziehungen zwischen TSI und dem Wärmegehalt der Ozeane zwischen den Ozeanen und auf verschiedenen Zeitskalen variieren können (Wang et al. 2020 ).

Der „Ozean als Puffer“-Mechanismus allein könnte möglicherweise das scheinbare „11-Jahres-Zyklus-Paradoxon“ lösen und implizieren, dass Untersuchungen zum Einfluss der Sonne auf das Klima wahrscheinlich der Betrachtung von TSI und Klimavariabilitäten auf Zeitskalen, die länger als ~11 sind, Vorrang einräumen sollten Jahreszyklus, d. h. von mehreren Dekaden bis zu Hundertjahren oder länger. Wir stellen jedoch fest, dass es selbst im Hinblick auf die ~11-Jahres-Komponente erhebliche Debatten über das Ausmaß des Sonneneinflusses gibt. In der Literatur schwanken Schätzungen der solarinduzierten Variabilität der Meerestemperaturen im Verlauf eines Zyklus zwischen 0,02 und 0,2 °C (Shaviv 2008 ; White et al. 1997 , 1998 ; Douglass & Clader 2002 ; Camp & Tung 2007a ; Zhou & Tung 2010; Ruzmaikin & Aumann 2012 ). Daher scheint eine weitere Untersuchung der Rolle von TSI auf der 11-Jahres-Zeitskala weiterhin gerechtfertigt. Shaviv ( 2008 ) fand Beweise für einen solaren Einfluss auf die Meerestemperaturen über den 11-Jahres-Zyklus, der fünf- bis siebenmal größer war als das, was er allein aufgrund der Änderungen im TSI erwartet hätte (Shaviv 2008 ) . Er schlug vor, dass dies darauf hindeutet, dass eine Art solarer Verstärkungsmechanismus beteiligt sein könnte , wie wir ihn in Abschnitt 2.6.4 besprechen werden.

Dies wird von Solheim ( 2013 ) unterstützt, der eine enge Korrelation zwischen globalen jährlichen gemittelten Meeresspiegeländerungen und jährlich gemittelten Sonnenfleckenzahlen feststellte (Solheim 2013 ).

### 2.6.3. In bestimmten Regionen sind die Auswirkungen des Sonnenklimas stärker ausgeprägt

In Abschnitt 2.6.1 haben wir gezeigt, dass mehrere Studien argumentiert haben, dass die solare Variabilität *indirekt* regionale Temperaturtrends beeinflussen könnte, z. B. über eine Veränderung der atmosphärischen Zirkulationsmuster. Andere Studien argumentieren jedoch für einen direkteren Zusammenhang zwischen solarer Variabilität und *regionalen* Klimatrends.

Unter Verwendung einer der TSI-Schätzungen mit hoher Variabilität (Hoyt & Schatten 1993 ) fand Soon eine auffällige Korrelation zwischen TSI und den arktischen Oberflächenlufttemperaturen seit mindestens 1875, d. h. der gesamten Länge des damals verfügbaren Temperaturdatensatzes (Soon 2005 , 2009 ). . Dies deutet darauf hin, dass die meisten Temperaturtrends in der Arktis seit mindestens dem 19. Jahrhundert (einschließlich der Erwärmung der Arktis seit den 1970er Jahren) eher auf solare Schwankungen als auf anthropogene Faktoren zurückzuführen sind. Interessanterweise argumentierte auch Callendar ( 1938 ) in seinem ursprünglichen Fall einer CO<sub>2</sub>-bedingten globalen Erwärmung (Callendar 1938 ) gegen eine anthropogene Rolle bei den Temperaturtrends in der Arktis. Bald et al. ( 2011 ) kam später für China zu einem ähnlichen Ergebnis (Soon et al. 2011 ), während Scafetta et al. Dasselbe wurde für den Temperaturdatensatz Mittelenglands von mindestens 1700 bis heute gefunden (Scafetta & Willson 2014 ; Scafetta 2013 , 2014b ). Bald et al. ( 2015 ) stellten fest, dass nach Berücksichtigung der Urbanisierungsverzerrung in den Temperaturdaten der nördlichen Hemisphäre dieselbe TSI-Schätzung die meisten langfristigen Temperaturtrends seit mindestens 1881 für die gesamte Hemisphäre (jedoch nicht für städtische Gebiete) erklären könnte (Soon et al . 2015 ). Soon & Legates ( 2013 ) fanden auch Hinweise darauf, dass dieselbe TSI-Schätzung einen Großteil der Trends im sogenannten EPTG (Soon & Legates) erklären könnte (2013 ). Mit anderen Worten: Die TSI-Schätzung von Hoyt & Schatten ( 1993 ) impliziert eine sehr starke Korrelation zwischen den Oberflächenlufttemperaturen und dem TSI. Dies wurde tatsächlich bereits von Hoyt & Schatten ( 1993 ) festgestellt. Einer von uns (JES) hat festgestellt (Manuskript in Vorbereitung), dass diese TSI-Schätzung auch gut mit der 440 Jahre langen Reihe geschätzter Positionen der August-Eiskante in der Barentssee korreliert, die in Mörner et al. beschrieben wurde. ( 2020 ).

On the other hand, if researchers use one of the low variability TSI estimates of Figure 2, or even rely on the raw SSN record as a proxy of solar activity, it is much harder to find a strong relationship. Nonetheless, several researchers have argued that significant correlations can still be

identified between solar activity and surface temperature and/or precipitation for certain geographical regions (Le Mouél et al. 2008, 2010; Kossobokov et al. 2010; Solheim et al. 2012; Mörner et al. 2020; Lüdecke et al. 2020; Dobrica et al. 2009; Dobrica et al. 2010; Laurenz et al. 2019).

Beispielsweise argumentierten Le Mouél und Kollegen in einer Reihe von Arbeiten (unabhängig von ihren neueren Arbeiten, die in Abschnitt 2.5.2 besprochen werden), dass klimatische Trends in Europa (Le Mouél et al. 2008, 2010; Kossobokov et al. 2010; Le Mouél et al. 2009), die Vereinigten Staaten (Le Mouél et al. 2009; Courtillot et al. 2010) und möglicherweise Australien (Le Mouél et al. 2008) stimmten darin überein, zumindest teilweise solarbetrieben zu sein. Diese Studien wurden von Yiou et al. insgesamt bestritten. In zwei Arbeiten (Yiou et al. 2010; Legras et al. 2010), obwohl Le Mouél et al. (2011) verteidigten ihre Analyse (Le Mouél et al. 2011).

Im Rahmen des Paradigmas des „11-Jahres-Puzzles“ könnten diese Studien möglicherweise auf verschiedene Weise interpretiert werden:

1. Dabei könnte es sich um Fallstudien handeln, die für viel umfassendere globale Beziehungen zwischen Sonne und Klima repräsentativ sind und in globalen Analysen, die subtile Zusammenhänge beispielsweise durch Mittelwertbildungsprozesse glätten, möglicherweise übersehen werden. In einigen Fällen sind diese Studien auch auf bestimmte Regionen beschränkt, einfach weil die relevanten Daten für andere Regionen nur begrenzt verfügbar sind (Le Mouél et al. 2008; Scafetta & Willson 2014; Soon et al. 2015; Scafetta 2014b). In anderen Fällen kann die Analyse als Fallstudie durchgeführt werden (Dobrica et al. 2009; Dobrica et al. 2010; Butler 1994; Soon et al. 2011). Dies könnte dann möglicherweise dem „11-Jahre-Paradoxon“ widersprechen, wenn sich später herausstellen würde, dass die Beziehungen globaler Natur sind. Vor diesem Hintergrund haben Dobrica et al. (2018) argumentieren, dass die Sonne-Klima-Beziehungen, die sie in ihren frühen Fallstudien über Europa identifiziert haben (Dobrica et al. 2009; Dobrica et al. 2010), nun auch auf einen Großteil der nördlichen Hemisphäre und für verschiedene Ebenen der nördlichen Hemisphäre ausgedehnt werden können Atmosphäre von der Oberfläche bis zur Stratosphäre (Dobrica et al. 2018).
2. Andererseits könnte man argumentieren, dass diese Beziehungen rein regionaler Natur sind. Das heißt, die Studien haben möglicherweise gerade einzigartige geografische Regionen identifiziert, in denen die Klimatrends einen besonders ausgeprägten solaren Einfluss haben (Le Mouél et al. 2010; Kossobokov et al. 2010; Solheim et al. 2012; Mörner et al. 2020; Lüdecke et al. 2020; Dobrica et al. 2009; Dobrica et al. 2010; Laurenz et al. 2019). Dies



könnte dann mit dem „11-Jahres-Paradoxon“ vereinbar sein, das sich auf globale Trends bezieht

3. Eine andere Interpretation bietet einen Kompromiss zwischen den beiden anderen – vielleicht stellen diese Regionen wichtige klimatische „Wirkungszentren“ dar (Christoforou & Hameed 1997). In diesem Fall könnte die solarbedingte Klimavariabilität dieser Regionen möglicherweise wiederum zu Verschiebungen der vorherrschenden atmosphärischen und/oder ozeanischen Zirkulationsmuster führen. Christoforou & Hameed (1997) schlugen vor, dass dies grundsätzlich potenzielle Mechanismen bieten könnte, durch die eine relativ geringe Variabilität des TSI über den 11-Jahres-Zyklus indirekt zu multidekadischen Klimatrends auf regionaler oder sogar globaler Ebene führen könnte. Es wurden mehrere Beispiele für solche potenziellen Mechanismen vorgeschlagen, z. B. Soon (2009); Mörner et al. (2020). Nebenbei bemerkt haben Mörner et al. (2020) schlug vor, dass der Sonnenwind und nicht TSI der Hauptklimatreiber sein könnte. Sie schlagen vor, dass der Sonnenwind mit der Magnetosphäre interagiert und die Rotationsgeschwindigkeit der Erde (Tageslänge oder LOD (Duhau & Martínez 1995; Duhau & de Jager 2012)) beeinflusst und dass dies die Zentripetalbeschleunigung der Erde verändert und sich wiederum ändern könnte vorherrschende ozeanische Zirkulationsmuster.

#### 2.6.4. Durch galaktische kosmische Strahlung angetriebene Verstärkungsmechanismen

In Section 2.6.1, we discussed how several researchers have argued for Sun/climate relationships that are driven by the larger variability in the UV component of the solar cycle, rather than the more modest variability over the solar cycle in TSI. Since most of the incoming UV irradiance is absorbed in the stratosphere, this has led to various "top-down" mechanisms whereby the Sun/climate relationships begin in the upper atmosphere before being propagated downward, as schematically illustrated in Figure 4(a). However, other researchers have focused on a separate aspect of solar variability that also shows considerable variability over the solar cycle, i.e., changes in the numbers and types of GCRs entering the Earth's atmosphere. Because the variability in the GCR fluxes can be different at different altitudes, but some GCRs are absorbed in both the troposphere and the stratosphere, such mechanisms could potentially be relevant throughout the atmosphere (Carslaw et al. 2002; Ney 1959; Dickinson 1975) – Figure 4(c). Also, because both the flux and the variability in the incoming GCR fluxes increase with latitude (greatest at the geomagnetic poles (Carslaw et al. 2002; Ney 1959; Dickinson 1975)), if such mechanisms transpire to be valid, this might mean that the Sun/climate relationships are more pronounced in some regions than others (Sect. 2.6.3).

Although some cosmic rays come from the Sun, GCRs are believed to come from other stellar systems, especially from the explosions of nearby supernovae. However, the solar wind appears to reduce the flux of GCRs entering the Earth's atmosphere, and since the solar wind increases with solar activity, the flux of GCRs appears to be inversely proportional to solar activity. Even though the flux of GCRs is much weaker than incoming TSI, GCRs are responsible for much of the ionization that occurs in the atmosphere. Indeed, this is why changes in the ratios of cosmogenic isotopes such as  $^{14}\text{C}$  or  $^{10}\text{Be}$  are often used as proxies for solar activity (Sect. 2.3).

For this reason, Ney (1959) and Dickinson (1975) both hypothesized that changes in the GCR flux might actually be climatically significant through ionization processes and/or interactions with electric fields. For instance, Ney suggested that changes in the GCR flux might lead to changes in storminess (especially thunderstorms) (Ney 1959). Dickinson speculated that if GCRs were involved in a significant Sun/climate mechanism, then a plausible candidate mechanism would involve some connection between GCRs and cloud formation. He openly admitted that his hypotheses were strictly speculative and warned "*I have so piled speculation upon speculation that much further argument does not seem profitable*". However, he hoped "*...that this discussion has provided some guidance as to fruitful avenues for further research into physical connections between solar activity and the lower atmosphere*" (Dickinson 1975).

Twenty-two years later, Svensmark & Friis-Christensen (1997) noticed an intriguing result that appeared to have vindicated Dickinson's speculations. They noticed a striking correlation between the GCR flux and satellite estimates of global cloud cover, according to the ISCCP-C2 dataset over the then-available period, 1983–1990. Although this was a relatively short period, it captured a considerable portion of a solar cycle and implied a strong and pronounced Sun/climate mechanism that had not been considered by the climate models. The study was criticized (Kernthaler et al. 1999; Jørgensen & Hansen 2000), but also defended (Svensmark & Friis-Christensen 2000).

Kernthaler et al. (1999) reanalyzed the ISCCP-C2 dataset to distinguish between "high", "medium" and "low" clouds and also split the global data into latitudinal bands. They argued that taking this more granular approach, the apparent relationship between GCRs and cloud coverage disappeared (Kernthaler et al. 1999). When the ISCCP dataset was updated to 1994 and upgraded to version "D2", the dataset providers included similar granular breakdowns. Independently, both Pallé Bagó & Butler (2000); Pallé & Butler (2001) and Marsh & Svensmark (2000) confirmed that the original relationship had broken down but that a more nuanced relationship still remained – it appeared that there was a strong correlation between GCR flux and the percentage of low cloud cover, particularly for lower latitudes (Pallé Bagó & Butler 2000; Marsh & Svensmark 2000). This appeared

counterintuitive, as it had been supposed that any such effect would actually be greatest for high clouds and high latitudes. Nonetheless, the correlation was quite striking and now covered a longer period (1983-1994).

As before, this updated relationship was criticized (Laut 2003; Damon & Laut 2004; Sun & Bradley 2002, 2004; Kristjánsson et al. 2004) but also defended (Marsh & Svensmark 2003, 2004) and gained some support from other researchers (Carslaw et al. 2002; Harrison & Stephenson 2006). However, when the ISCCP-D2 dataset was updated to 2001, Marsh & Svensmark (2003) noticed that the apparent relationship seemed to breakdown again (Marsh & Svensmark 2003). Yet, they also noted that there was a gap in the available ISCCP calibration satellites between September 1994 and January 1995, and that if a single step calibration adjustment was applied to the data during this gap, the correlation between low cloud cover and GCRs remained for the entire updated 1983-2001 period (Marsh & Svensmark 2003). Meanwhile, Sun & Bradley (2004) argued that the entire ISCCP D2 time series was unreliable and that ground-based time series (which appeared to contradict the GCR/cloud hypothesis) were preferable (Sun & Bradley 2004), while Marsh & Svensmark (2004) argued the opposite (Marsh & Svensmark 2004). More recently, Agee et al. (2012) asserted that the GCR-cloud hypothesis breaks down when the (unadjusted) ISCCP-D2 dataset was updated to 2008, as it implied unusually low cloud cover during a period of unusually high GCR flux (Agee et al. 2012). On the other hand, Evan et al. (2007) had already argued that the unusually low cloud cover values of the ISCCP dataset were due to "*satellite viewing geometry artifacts and [...] not related to physical changes in the atmosphere*" (Evan et al. 2007).

We sympathize with readers who find these controversies over the reliability of the global cloud cover datasets unsettling. At any rate, Kristjánsson et al. (2004) raised an important additional challenge to the theory by noting that, because GCR fluxes are quite well correlated to other metrics of solar activity, similar correlations could be found between TSI and cloud cover (Kristjánsson et al. 2004). They also carried out spatial correlations instead of just comparing the global time series and found that some regions had stronger correlations than others (Kristjánsson et al. 2004). Pallé et al. (2004) also found similar results (Pallé et al. 2004).

In a series of papers, Voiculescu et al. have built on these ideas and carried out regional analyses on the basis that the cloud cover in different regions might be influenced by different factors, including different solar drivers (Dima & Voiculescu 2016; Voiculescu et al. 2006; Voiculescu & Usoskin 2012; Voiculescu et al. 2013). Voiculescu et al. found a solar influence on the cloud cover in many regions but, in some regions and for different types of clouds, the correlations were better with

changes in UV irradiance. For other regions, the correlations were better with changes in GCR flux, while for others the cloud cover seemed to be influenced by non-solar factors (Voiculescu et al. 2006; Voiculescu & Usoskin 2012).

While less exciting than the original Svensmark & Friis-Christensen (1997) result (Svensmark & Friis-Christensen 1997), these more nuanced analyses where GCRs are just one of several potential drivers of changes in cloud cover are still consistent with the overall theory that changes in GCR fluxes could be a driver of global temperature changes. However, it suggests that more subtle regional effects need to be considered. It also confirms that it is challenging to separate a specific GCR-driven mechanism from other solar-driven mechanisms (Carslaw et al. 2002).

A potentially useful approach for trying to evaluate these more nuanced proposed GCR/cloud connections is to look for any significant cloud changes associated with Forbush decrease (FD) events. These are occasional events (typically a few each year) following a Coronal Mass Ejection (CME) when the solar wind temporarily increases for a few hours, substantially reducing the GCR flux for a few days. Although CMEs also influence other aspects of solar activity, this temporary effect on GCR flux is quite pronounced, and therefore if the GCR/cloud mechanisms are valid, we would expect that evidence for this could be identified by comparing climatic conditions during the event to those of the days immediately before and after the event.

Several studies taking this approach have reported significant climatic changes associated with FD events. For instance, analyzing ground-based sunlight measurements at several UK weather stations, Harrison & Stephenson (2006) noted an average reduction in diffuse solar radiation (i.e., cloudier weather) during FD events (Harrison & Stephenson 2006). Similarly, Svensmark et al. (2009) found that the liquid water content of low clouds could be reduced by up to 7% during FD events (Svensmark et al. 2009). However, again, these studies are typically contested, e.g., Laken et al. (2009) and Calogovic et al. (2010) disputed Svensmark et al. (2009)'s analysis and argued that there was no statistically robust relationship between FDs and cloud cover.

Part of the challenge is that some FD events are stronger than others, and they are so sporadic that the number of strong events over a relatively short period such as the satellite era is quite limited. To overcome this limitation, Dragić et al. (2011) regarded records of the "Diurnal Temperature Range" (DTR), i.e., the difference between the daily maximum and daily minimum temperatures from 189 European weather stations, as a proxy for cloud cover (Dragić et al. 2011). This allowed them to study a much longer time period than the satellite era. They found statistically significant changes in DTR for strong FDs with a GCR reduction of at least 7% (Dragić et al. 2011). However, Laken et al. (2012) argued that the statistical averaging techniques used by both Dragić et al. (2011) and

Svensmark et al. (2009) were inappropriate. On the other hand, after Svensmark et al. (2016) carried out a more robust statistical analysis, they concluded that "there is a real influence of FDs on clouds probably through ions" (Svensmark et al. 2016).

Eine anhaltende Debatte über die Relevanz der GCR/Wolken-Theorie dreht sich um den genauen physikalischen Mechanismus, durch den Änderungen der GCRs die Wolkenbedeckung beeinflussen könnten (Carslaw et al. 2002 ; Kirkby 2007 ). Dies hat zu erheblichen Laborarbeiten geführt, um zu versuchen, die verschiedenen Schritte der Wolkenbildung in einem geschlossenen System (in Innenräumen) nachzubilden und die Rolle von GCRs im Verhältnis zu anderen Faktoren zu bewerten. Dazu gehören Nebelkammerexperimente von Svensmark et al. im „SKY“-Projekt (Svensmark et al. 2017 ; Enghoff et al. 2011 ; Svensmark et al. 2013 ) und einer unabhängigen CERN-basierten Gruppe im Rahmen des „CLOUD“-Projekts von Kirkby et al. (Kirkby 2007 ; Kirkby et al. 2011; Gordon et al. 2017 ; Pierce 2017 ). Diese Experimente haben bestätigt, dass die Ionisierung durch GCRs unter bestimmten Umständen die Geschwindigkeit der Wolkenkeimbildung zu erhöhen scheint (Svensmark et al. 2017 ; Enghoff et al. 2011 ; Svensmark et al. 2013 ; Kirkby et al. 2011 ). Es gibt jedoch Debatten darüber, ob es erhebliche Regionen gibt, in denen die Wolkenbildung durch einen Mangel an GCRs gehemmt wird. Insbesondere Computersimulationen unter Einbeziehung globaler Aerosolmodelle, die anhand einiger CLOUD-Ergebnisse kalibriert wurden, legen nahe, dass GCRs keinen wesentlichen Beitrag leisten (Gordon et al. 2017 ; Pierce 2017 ). Aber Kirkby et al. ( 2011) hatte festgestellt, dass diese Modelle die beobachteten Daten immer noch nicht sehr gut erklären können (Kirkby et al. 2011 ). Mittlerweile wurde argumentiert, dass zumindest für die Antarktis die Wolkenbedeckung offenbar durch GCRs beeinflusst wird (Jokinen et al. 2018 ).

Obwohl sich ein Großteil der Diskussion über mögliche Zusammenhänge zwischen GCRs und dem Klima auf die Theorie von Svensmark et al. konzentrierte, argumentierten andere Gruppen für subtilere Effekte, z. B. durch die Beeinflussung der stratosphärischen Ozonkonzentrationen (Kilifarska 2015) oder durch die Beeinflussung von Zyklon- und Anti-Ozon- Konzentrationen . Zyklonaktivität (Artamonova & Veretenenko 2014 ). Insbesondere Tinsley et al. haben argumentiert, dass GCRs mit dem Klima interagieren, indem sie den globalen Stromkreis beeinflussen (Tinsley & Heelis 1993 ; Tinsley 2012 ; Lam & Tinsley 2016 ). Dies baut auf einigen der ursprünglichen Hypothesen von Ney ( 1959 ) und Dickinson ( 1975 ) auf (Dickinson 1975 ). Carslaw et al. ( 2002) stellte fest, dass solche Mechanismen selbst die Wolkenbedeckung beeinflussen könnten – was es schwierig macht, zwischen der spezifischen Theorie von Svensmark et al. und anderen subtileren GCR-/Wolken-/Klimamechanismen zu unterscheiden (Carslaw et al. 2002 ) . Tinsley et al. haben inzwischen mehrere Studien veröffentlicht, die auf mögliche Verbindungen zwischen GCRs und dem Klima über den globalen Stromkreis hinweisen, z. B. (Tinsley & Heelis 1993 ; Tinsley 2012 ;

Lam & Tinsley 2016 ; Zhou et al. 2016 ; Zhang et al. 2020b ). . Auch andere haben unabhängige Analysen vorgelegt, die einigermaßen mit solchen Mechanismen übereinstimmen (Carslaw et al. 2002 ; Harrison & Stephenson 2006) .; Voiculescu et al. 2013 ; Harrison et al. 2013 ).

Unabhängig vom genauen Mechanismus, durch den GCRs das Klima beeinflussen könnten, stellten Shaviv & Veizer ( 2003 ) fest, dass sie beim Vergleich von Schätzungen vergangener Paläotemperaturen und vergangener GCR-Flüsse über die letzten 500 Millionen Jahre eine viel bessere Übereinstimmung fanden als zwischen Paläotemperaturen und Schätzungen Vergangenheit  $\text{CO}_2$  (Shaviv & Veizer 2003 ). Diese Studie wurde sowohl von Rahmstorf et al. ( 2004a ) und Royer et al. ( 2004 ), wobei diese Kritik zu Widerlegungen und Gegenwiderlegungen von beiden Seiten führte (Shaviv & Veizer 2004 ; Rahmstorf et al. 2004b ; Shaviv & Veizer 2004 ).). Eine große Herausforderung besteht darin, dass derzeit erhebliche Debatten darüber geführt werden, welche Schätzungen der vergangenen Temperatur, des  $\text{CO}_2$ -Ausstoßes und der Sonnenaktivität auf diesen Zeitskalen am zuverlässigsten sind. Infolgedessen argumentieren einige Studien, dass die ursprüngliche Analyse von Shaviv und Veizer im Großen und Ganzen richtig war (Svensmark 2007 ; Shaviv 2005 ; Svensmark 2012 ; Shaviv et al. 2014 ), während andere anderer Meinung sind (Royer 2006 ; Lanci et al. 2020 ).

Die Beweise für und gegen einen signifikanten Einfluss von GCRs auf das Klima waren eindeutig kontrovers und zweideutig, mit vielen Befürwortern (Svensmark 2007 , 2019 ; Dragić et al. 2011 ; Shaviv et al. 2014 ; Maghrabi & Kudela 2019 ) und Kritikern ( Sloan & Wolfendale 2013 ; Laken et al. 2012 ; Pierce 2017 ; Lanci et al. 2020 ; Kulmala et al. 2010 ) der Theorie, während andere neutraler bleiben (Dima & Voiculescu 2016 ; Pallé & Butler 2001 ; Voiculescu et al. 2013 ; Harrison et al. 2013 ; Yu & Luo 2014 ). Darüber hinaus gibt es derzeit erhebliche Debatten darüber, welche Nettoauswirkungen Änderungen der GCR-Flüsse auf das Klima hätten. Tatsächlich ist es erwähnenswert, dass die ursprüngliche Hypothese von Ney ( 1959 ) implizierte, dass eine erhöhte Sonnenaktivität zu einem Nettokühlungseffekt führen sollte (Ney 1959 ), also das Gegenteil der Theorie von Svensmark et al. (Svensmark & Friis-Christensen). 1997 ; Svensmark 2007 , 2019 ; Marsh & Svensmark 2003 ). Eine weitere Komplikation besteht darin, dass die Rolle von Wolken offenbar davon abhängt, ob man kurze oder lange Zeitskalen berücksichtigt, z. B. Young et al. ( 2019 ) schlagen vor, dass sich der Nettoklimaeffekt von Wolken von einer negativen Rückkopplung der Wolkentemperatur zu einer positiven Rückkopplung der Wolkentemperatur ändern kann, wenn unterschiedliche Zeitskalen berücksichtigt werden (Young et al. 2019 ) .

Dennoch wird von Befürwortern der GCR/Wolken-/Klima-Theorie anerkannt (Svensmark 2007 , 2019 ; Marsh & Svensmark 2003 ), dass sie nicht so eindeutig ist, wie das faszinierende Ergebnis von Svensmark & Friis-Christensen ( 1997 ) ursprünglich impliziert wurde (Svensmark & Friis-

Christensen 1997 ). Kritiker der Theorie räumen jedoch auch ein, dass GCRs offenbar einen gewissen Einfluss auf die Wolkenbildung haben und dass unser Verständnis darüber, wie und warum die Wolkenbedeckung variiert, noch recht begrenzt ist (Gordon et al. 2017; Pierce 2017 ). Kritiker der Theorie haben auch eingeräumt, dass das Interesse an der Theorie für die Gemeinschaft wertvoll war, da sie zu mehr Forschung zu diesen anspruchsvollen Themen geführt hat, einschließlich der SKY- und CLOUD-Projekte (Gordon et al. 2017; Pierce 2017 ) .

## 2.6.5. Kurzfristige Orbitaleffekte

### 2.6.5.1. *Die Differenz zwischen der durchschnittlichen Erde-Sonne-Entfernung (1 AE) und der täglichen Erde-Sonne-Entfernung*

Es lohnt sich auch, kurz zwischen Änderungen der Sonneneinstrahlung, die die Sonne verlässt, und Änderungen der Sonneneinstrahlung, die die Erde erreicht, zu unterscheiden. Ein Großteil des Interesses am Verständnis der Veränderungen der Sonnenaktivität konzentrierte sich auf Ersteres. Daher wird der TSI typischerweise anhand der Leistung beschrieben, die 1 AE erreicht, also die durchschnittliche Entfernung der Erde von der Sonne. Dies gilt für die meisten der in diesem Artikel diskutierten TSI-Rekonstruktionen. Wie jedoch in Soon et al. ( 2015 ) Da die Umlaufbahn der Erde um die Sonne eher elliptisch als kreisförmig ist, variiert der physische Abstand der Erde von der Sonne im Laufe des Jahres erheblich. Derzeit erhält die Erde 6,5 % mehr TSI ( $88 \text{ W m}^{-2}$ ) im Januar (dh im Winter auf der Nordhalbkugel) während des Perihels (dem sonnennächsten Punkt der Erde) als im Juli (im Sommer auf der Nordhalbkugel) während des Aphels (dem sonnenfernsten Punkt der Erde). Wenn wir uns also für die Auswirkungen von Änderungen der Sonnenaktivität *auf das Erdklima* interessieren, dann sind wir wohl mehr an den Änderungen der TSI interessiert, die tatsächlich die Erde erreichen, als an den Änderungen der TSI, die eine Entfernung von 1 AE erreichen.

Because the seasonal cycles of the Earth's orbit are almost identical each year, it might initially be supposed that the annual averages of the TSI reaching the Earth and that reaching 1 AU should be perfectly correlated with each other. If so, then this would mean that, when averaged over the year, this difference between the TSI reaching the Earth compared to that at 1 AU would be trivial. In that case, using 1 AU estimates for evaluating the potential effects of varying TSI on the Earth's climate would be easier, since the variations in TSI from year-to-year are easier to see in the TSI data at 1 AU compared to that at Earth's distance (as will be seen below).

This appears to be an implicit assumption within much of the literature evaluating the effects of varying TSI on the Earth's climate. However, we note that there are subtle, but often substantial, differences that can arise between the annual averages at 1 AU versus Earth's distance since most of

the trends in TSI (including the  $\sim 11$ -year cycle) are on timescales that are **not** exact integer multiples of the calendar year.

We appreciate that mentally visualizing the differences that can arise between the two different estimates is quite tricky, even if you have a high degree of visual spatial intelligence. Therefore, in order to demonstrate that there are indeed subtle but significant differences between the annual averages of TSI at 1 AU versus the TSI reaching the Earth, we compare and contrast the SORCE/TIM TSI datasets for 1 AU and Earth's distance in Figure 5. The SORCE/TIM datasets are the results from a single satellite that operated from 2003 to 2020, and it is particularly relevant because the data are reported for both 1 AU and at the in-situ Earth's orbit. This period covers roughly 1.5 Solar Cycles – Figure 5(b).

**Fig. 5** Comparison of the amount of TSI that reaches the Earth as opposed to 1 AU, i.e., the mean distance of the Earth from the Sun. (a) illustrates schematically (not to scale) how the Earth-Sun distance increases and decreases over the calendar year due to the elliptical nature of the Earth's orbit. The images of the Sun, Earth and Moon are public domain images published by NASA. The Sun image was taken by the SOHO space craft on 2008 September 24 (Credit: SOHO Consortium, EIT, ESA, NASA, <https://apod.nasa.gov/apod/ap080924.html>). The Earth and Moon image is a composite created by Reto Stöckli, Nazmi El Saleous and Marit Jentoft-Nilsen, NASA GSFC (<https://earthobservatory.nasa.gov/images/885/earth-from-space>). (b)–(d) present the results of the SORCE/TIM Sun-monitoring satellite program (2003–2020), as downloaded from [http://lasp.colorado.edu/data/sorce/tsi\\_data/](http://lasp.colorado.edu/data/sorce/tsi_data/) (accessed 2020/06/26). (b) plots the daily averages at 1 AU. (c) compares the daily averages at 1 AU and at the Earth's actual distance from the Sun. (d) compares the annual averages and (e) plots the differences between the annual means. A small number of days had missing data. We interpolated these data points following the method described in the text. In (b) and (c), the interpolated points are indicated using *dashed lines*. In (d), those years with some interpolated data are indicated by *dashed lines*.

Before describing the results in Figure 5, we should note some technical points on this analysis. We downloaded the daily-resolved datasets for both versions from [http://lasp.colorado.edu/data/sorce/tsi\\_data/](http://lasp.colorado.edu/data/sorce/tsi_data/) (accessed 26/06/2020). Unfortunately, the full SORCE TSI data records from 2003 February 25 through 2020 February 25 do not have continuous daily



measured values for either the in-situ Earth's orbit or the 1 AU distance adjusted data. On average there are 11 missing days for all years except 2013, 2003 and 2020. 2013 was missing 160 daily values, and discounting 2013, the average for the full 2004–2019 period is 22.5 missing days per year. To fill in the missing daily TSI values, we applied a more sophisticated method than just a linear interpolation. For the 1 AU TSI values, we rely on an artificial intelligence algorithm that matched not only the amplitude of the measured daily TSI values but also the spectral properties of the measured SORCE TSI record. In addition, PMOD TSI data were utilized and were calibrated to SORCE's TIM daily series applying the method proposed by Soon et al. (2019a). The PMOD data between 2003 and 2017 were standardized with characteristics of the TIM and then added to the TIM records. The data between 2018 and 2020 that were missing in the TIM series were consecutively less than 5 days and therefore were estimated using the method of Radial Basis Function Artificial Neural Networks (RBFANN). Our RBFANN has three layers of neurons: one input (objective data in this case from TIM), one hidden and one output (matching the high- or low-frequency spectral properties). For the daily TSI values at Earth's orbit, another set of RBFANN was constructed to fill in the missing daily values. Therefore, by applying these advanced and more elegant techniques than interpolation per se, we can generate the complete daily SORCE/TIM's TSI composite time series for both Earth orbit and at 1 AU perspectives.

The daily results are shown in Figures 5(b) and 5(c), with the interpolated points indicated with dashed lines (and slightly different colors). The annual means of both versions are compared in Figure 5(d). Note that the y-axes each have a different range. This is because, as noted above, the seasonal cycle in the TSI reaching the Earth is of the order of  $90 \text{ W m}^{-2}$ , while the variability in TSI over the solar cycle is only of the order of a few  $\text{W m}^{-2}$ . As a result, the pronounced  $\sim 11$  year Solar Cycles that can be seen in the 1 AU plot of Figure 5(b) are barely noticeable when viewed on the scale of Figure 5(c).

That said, when the annual averages of both time series are calculated, this seasonal cycle is no longer an issue, and the two time series can be directly compared, as in Figure 5(d). However, as can be seen from Figure 5(e), while the two annual time series are broadly similar, albeit with the 1 AU values being slightly lower than that at Earth distance, the differences between the two time series vary slightly from year-to-year. Over the 16 year period, the differences between the two annual averages varied from  $+0.35 \text{ W m}^{-2}$  (2013) to  $-0.06 \text{ W m}^{-2}$  (2014), i.e., a range of  $0.41 \text{ W m}^{-2}$ . It could be argued that the 2014 estimate is anomalous in that this was the year with the most data interpolation. But, even neglecting that year, the differences between the two averages varied between  $0.34$  and  $0.15 \text{ W m}^{-2}$ , i.e., a range of nearly  $0.2 \text{ W m}^{-2}$ . For comparison, the difference between the maximum and minimum annual TSI at 1 AU over the same period was  $0.9 \text{ W m}^{-2}$ . So, while small as a percentage of the absolute TSI, these subtle differences are not insignificant.

These differences between the annual averages for each year might initially be surprising. For the analysis in Figure 5, we are assuming that the *SORCE* datasets at both 1 AU and the Earth's distance are reliable. We also are assuming that the interpolations we have carried out (described earlier) are reasonable. However, even if either of those assumptions are problematic, we should stress that the fact that there are differences between the annual means for both versions that vary from year to year is actually to be expected on statistical grounds. The general principle can be understood once we recognize (a) the elliptical shape of the Earth's orbit and (b) that the  $\sim 11$ -year Solar Cycle does not fall exactly on the calendar year. This means that the times of the year during which a given rise or fall in TSI occurs can make a difference. For instance, if the maximum of a solar cycle occurred during January, then this will lead to a greater mean TSI for the year than if it had occurred during July of the same year. This is because the Earth is currently closer to the Sun in January than in July.

To clarify, if the trends in TSI over a given calendar year are reasonably linear statistically, i.e., it has a constant slope, then this seasonality should not make much difference to the annual mean TSI. This is regardless of the slope itself, i.e., whether the trend is rising, falling or near-zero. However, if the trends for that year are non-constant, then the annual mean may be slightly higher or lower depending on whether the Earth is closer to perihelion or aphelion when the changes in the trends in TSI occur.

More generally, the annual average TSI reaching the Earth depends not just on the changes in TSI, but the times of the year over which those changes occur. The *SORCE* data in Figure 5 only covers roughly 1.5 Solar Cycles, but in principle, the same could apply to any other multidecadal trends which might be occurring in addition to the  $\sim 11$ -year cycle.

Since all of the TSI reconstructions discussed in Sections 2.2–2.5 are calculated in terms of the annual averages at 1 AU, for this paper we will limit our analysis to this. However, we encourage researchers who have until now limited their analysis of TSI variability to that at 1 AU to consider this extra complication in future research.

Wie aus Abbildung 5(e) ersichtlich ist, sind die sich ändernden Unterschiede zwischen dem jährlichen durchschnittlichen TSI bei 1 AE und dem, der die Erde erreicht, subtil, aber nicht trivial. Zusätzlich zu dieser Komplikation in Bezug auf die jährlichen Durchschnittswerte sollte eine umfassende Analyse der Auswirkungen von TSI auf das Erdklima die saisonalen Veränderungen in den verschiedenen Breitenverteilungen der eingehenden TSI aufgrund der saisonalen Umlaufbahnschwankungen der Erde berücksichtigen. Dabei gibt es mehrere unterschiedliche Aspekte, die jedoch der Einfachheit halber zusammenfassend als „Orbitalantriebe“ bezeichnet werden.

### 2.6.5.2. *Vergleich mit langfristigem Orbitalantrieb*

Die Theorie, dass Veränderungen des atmosphärischen CO<sub>2</sub> ein Haupttreiber des Klimawandels sind, wurde ursprünglich von Arrhenius im späten 19. Jahrhundert als vorgeschlagene Erklärung für die Übergänge zwischen Eis- und Zwischeneiszeit während der Eiszeiten entwickelt ( Arrhenius 1896 ). Die Existenz dieser dramatischen Klimaveränderungen im Zeitrahmen von mehreren Jahrtausenden wurde erst im 19. Jahrhundert <sup>nachgewiesen</sup> Jahrhundert und war eines der großen wissenschaftlichen Rätsel seiner Zeit. [Nebenbei bemerken wir, dass aus glaziologischer Sicht eine „Eiszeit“ üblicherweise als eine Periode definiert wird, in der in beiden Hemisphären große permanente Eisschichten vorhanden sind. Diese Eisschilde können sich während „Eiszeiten“ erheblich ausdehnen und während „Interglazialzeiten“ zurückgehen. Da Grönland und die Antarktis derzeit beide über große Eisschilde verfügen, befinden wir uns derzeit in einer Zwischeneiszeit (dem „Holozän“) innerhalb einer Eiszeit, auch wenn umgangssprachlich der Begriff „Eiszeit“ im Volksmund nur zur Beschreibung der „Eiszeiten“ verwendet wird. .

Diese CO<sub>2</sub>-getriebene Erklärung für die glazialen/interglazialen Übergänge wurde später z. B. von Ångström ( 1901 ) und Simpson ( 1929 ) kritisiert . Später wurde sie jedoch von Callendar ( 1938 ) wiederbelebt, der die Theorie dahingehend erweiterte, dass anthropogene CO<sub>2</sub> -Emissionen auch der Haupttreiber der Erwärmung vom Ende des 19. Jahrhunderts bis zur Mitte der 1930er Jahre waren ( Callendar 1938 ), und von Plass ( 1956 ). ), der spekulativ vorschlug (in der Erwartung, dass dies die wissenschaftliche Debatte anregen würde), dass atmosphärisches CO<sub>2</sub> auf den meisten Zeitskalen der Haupttreiber des Klimawandels sei (Plass 1956 ).

Eine konkurrierende Hypothese, die mehrere Forscher des 19. Jahrhunderts vorschlugen, z. B. Adhmar und später Croll (Fedorov 2019a ; Imbrie 1982 ; Bol'shakov et al. 2012 ; Sugden 2014 ), war, dass es zu langfristigen zyklischen Veränderungen in der Umlaufbahn der Erde kommen würde Die Sonne war der Treiber der glazialen/interglazialen Übergänge. Zu Beginn des 20. Jahrhunderts führte Milankovitch eine umfangreiche Reihe von Berechnungen durch, die zeigten, dass es mehrere wichtige zyklische Schwankungen in der Erdumlaufbahn gibt, die über Zehntausende von Jahren variieren und dass diese jeweils die einfallende Sonnenstrahlung in unterschiedlichen Breitengraden beeinflussen die Jahreszeiten (Cvijanovic et al. 2020 ; Szarka et al.2021 ).

In den 1970er Jahren schienen relativ hochpräzise Schätzungen des Zeitpunkts der glazialen/interglazialen Übergänge aus Meeressedimentkernen die Milankovitch-Eiszeittheorie zu bestätigen (Imbrie 1982 ; Hays et al. 1976 ). Das heißt, wenn Häufigkeitsanalysen wie in den Abschnitten 2.5.2 und 2.5.3 durchgeführt werdenAn den Tiefsee-Sedimentkernen wurden Untersuchungen durchgeführt. Sie legten nahe, dass die vergangenen Klimaveränderungen der letzten paar hunderttausend Jahre durch Periodizitäten von etwa 90.000 bis 120.000 Jahren und in

geringerem Maße von 40.000 bis 42.000 Jahren dominiert wurden hatte auch Spitzen bei 22.000–24.000 Jahren und 18.000–20.000 Jahren. Diese Gipfel entsprachen in etwa den von Milankovitch berechneten wichtigsten astronomischen Zyklen: 41.000 Jahre; 23.000 Jahre; 19.000 Jahre und in geringerem Maße ~100.000 Jahre. Infolgedessen wurde analog zu den in den Abschnitten 2.5.2 – 2.5.3 beschriebenen Argumenten argumentiert, dass die glazialen/interglazialen Übergänge tatsächlich durch orbitale Kräfte angetrieben wurden (Imbrie 1982 ; Hays et al. 1976 ).). Spätere Analysen anhand von Eiskernmessungen schienen diese Theorie ebenfalls zu bestätigen (Lorius et al. 1985 , 1992 ; Petit et al. 1999 ).

Dies scheint den Großteil der wissenschaftlichen Gemeinschaft davon überzeugt zu haben, dass die orbitale Erklärung von Milankovitch für die glazialen/interglazialen Übergänge richtig ist, und dies scheint derzeit das vorherrschende Paradigma in der Literatur zu sein (Cvijanovic et al. 2020; Szarka et al. 2021 ) . ; Petit et al. 1999 ; Kawamura et al. 2007 ; Maslin & Ridgwell 2005 ; Roe 2006 ; Imbrie et al. 1992 ; Lisiecki & Raymo 2005 ) einschließlich der IPCC-Berichte (IPCC 2013a ). Ironischerweise bedeutet dies, dass die ursprüngliche CO<sub>2</sub>-getriebene Theorie für die glazialen/interglazialen Übergänge, wie sie von Arrhenius vorgeschlagen wurde (1896 ); Callendar ( 1938 ); Plass ( 1956 ) wurde weitgehend verworfen, obwohl die aktuelle Theorie, dass der jüngste Klimawandel größtenteils durch Veränderungen des CO<sub>2</sub> verursacht wurde , aus dieser frühen Theorie entwickelt wurde. Dennoch betonen wir, dass dies nicht unbedingt ein Widerspruch ist, da mehrere Forscher argumentieren, dass Änderungen der atmosphärischen CO<sub>2</sub>- Konzentrationen , die durch orbital angetriebene Erwärmung oder Abkühlung verursacht werden, als positiver Rückkopplungsmechanismus wirken könnten (IPCC 2013a ; Cvijanovic et al. 2020 ; Petit et al. 1999 ; Kawamura et al. 2007 ; Maslin & Ridgwell 2005 ; Roe 2006 ; Imbrie et al.1992 ; Lisiecki & Raymo 2005 ).

Wir stellen fest, dass es mögliche Probleme mit der Theorie gibt, dass die Milankovitch-Orbitale der Haupttreiber der glazialen/interglazialen Übergänge sind. Zur Verdeutlichung: Die Milankovitch-Orbitalvariationen sind, wie oben diskutiert, eindeutig klimatisch bedeutsam. Auch die Idee, dass eine Kombination dieser Variationen die Erklärung für die glazialen/interglazialen Übergänge liefern könnte, erscheint plausibel und intuitiv. Tatsächlich ist die ungefähre zeitliche Ähnlichkeit beider Phänomene faszinierend. Allerdings gibt es, wie weiter unten erörtert wird, immer noch erhebliche Debatten über die genauen kausalen Mechanismen und darüber, welche spezifischen Aspekte der Milankovitch-Orbitalschwankungen zu solch dramatischen langfristigen Klimaveränderungen führen würden und warum. Allerdings wurde jedem dieser Probleme entgegengewirkt,

Vor diesem Hintergrund werden wir kurz auf einige der Bedenken eingehen, die im Zusammenhang mit der Milankovitch-Theorie der Eiszeiten und den entsprechenden Verteidigungsmaßnahmen geäußert wurden. Was die SPI-Theorien betrifft, so wurden viele der Hauptbedenken der Theorie von Befürwortern der Theorie hervorgehoben. Hays et al. ( 1976 ) stellte fest, dass die Dominanz der ~100.000-jährigen Periodizitäten in den Klimaaufzeichnungen unerwartet war, da nicht erwartet wurde, dass die relevanten ~100.000-jährigen Umlaufzyklen von Milankovitch (verbunden mit Änderungen der Exzentrizität) eine große Bedeutung für den Klimawandel haben würden, und Milankovitch und andere hatten angenommen, dass der etwa 41.000 Jahre dauernde Schrägheitszyklus im Hinblick auf Glaziale/Interglaziale klimatisch bedeutsamer gewesen wäre (Hays et al. 1976 ).

Imbrie ( 1982 ) wies auf ein weiteres Problem hin: Da es so viele unterschiedliche Aspekte des Timings der verschiedenen Orbitale in Bezug auf unterschiedliche Breitengrade und Jahreszeiten gibt, besteht die Gefahr, dass Forscher sich die Metrik aussuchen, die am besten zu den Daten ihrer Hypothese passt :

*„Es gab auch eine Tendenz bei den Forschern zu glauben, sie könnten die Reaktion des Systems anhand einer Strahlungskurve modellieren, die den Input an einem einzigen Breitengrad und einer einzelnen Jahreszeit darstellt. [...] Da niemand sicher sein konnte, welche Sonneneinstrahlungskurve, wenn überhaupt, „war der entscheidende Punkt, hatten die Forscher große Freiheit, eine Kurve zu wählen, die einem bestimmten Datensatz ähnelte. Verständlicherweise trug die daraus resultierende Mehrdeutigkeit erheblich dazu bei, das Vertrauen in die Gültigkeit der Zeitbereichsvorhersage zu untergraben.“ – Imbrie (1982), S. 413 ( Imbrie 1982 )*

An additional puzzle is that, while the dominant peak on orbital timescales for the last ~1 million years appears to be ~100 000 years, for most of the Pleistocene Ice Age until then, the dominant peak appears to have been the (expected) 41 000 years. This has been dubbed the "mid-Pleistocene transition", and there has been much debate over its explanation (Maslin & Ridgwell 2005; Raymo et al. 2006; Ashkenazy & Tziperman 2004; Tziperman et al. 2006; Rial et al. 2013; Huybers & Wunsch 2005).

Another potential concern is the so-called "Devils Hole" record. Winograd et al. (1992) obtained a continuous 500 000 year climate record from a core in Devils Hole, NV (USA), which matched quite well with both the Antarctic ice cores and various ocean sediment cores (Winograd et al. 1992). However, the Devils Hole record had a key difference from the other estimates – it implied that the previous interglacial period ("Termination II") began several millennia before Milankovitch theory predicted it should have (Winograd et al. 1992; Broecker 1992; Karner & Muller 2000). Therefore, if this estimate transpires to be accurate, then it creates a significant problem for the

Milankovitch ice age theory. That said, proponents of the Milankovitch explanation have criticized the reliability of the earlier Termination II timing implied by the Devils Hole record (Shackleton 1993; Imbrie et al. 1993; Shakun et al. 2011; Moseley et al. 2016a,b). However, rebuttals have been offered (Winograd & Landwehr 1993; Ludwig et al. 1993; Winograd et al. 2006; Coplen 2016; Winograd 2016).

If the glacial/interglacial transitions are not primarily-driven by the Milankovitch orbital cycles, then it raises the question as to why the glacial/interglacial transitions occur. Several different explanations have been proposed (Sharma 2002; Ehrlich 2007; Roe & Allen 1999; Wunsch 2004; Muller & MacDonald 1997b,a; Kirkby et al. 2004; Puetz et al. 2016; Ellis & Palmer 2016; Marsh 2014). However we note that all of these cited alternative hypotheses are openly speculative, and that several of these studies (and others) argue that Milankovitch orbital cycles are at least partially involved (Ashkenazy & Tziperman 2004; Tziperman et al. 2006; Huybers & Wunsch 2005; Roe & Allen 1999; Wunsch 2004; Ellis & Palmer 2016).

At any rate, regardless of the role the Milankovitch orbital cycles play in the glacial/interglacial transitions, we emphasize that the changes in the latitudinal and seasonal variability of the incoming TSI over these cycles are clearly climatically important. Indeed, while much of the research until now has focused on the gradual variations over millennial timescales or longer, e.g., Huybers & Denton (2008); Davis & Brewer (2009); Berger et al. (2010), in recent years, some groups have begun emphasizing the significance of "short-term orbital forcing" (STOF) (Cionco & Soon 2017), i.e., secular drifts on multidecadal to centennial timescales in the average daily insolation at different latitudinal bands for different seasons (Cionco & Soon 2017; Fedorov 2019a; Szarka et al. 2021; Cionco et al. 2018, 2020; Fedorov 2019b; Fedorov & Kostin 2020).

A challenge that arises when considering the Earth's orbital variability on these shorter timescales is that it is no longer sufficient to consider the Earth/Sun relationship in isolation. The perturbations of the Earth's orbit around the Sun by the Moon and by the other planets also need to be considered. For this reason, there is some overlap between much of the ongoing research into STOF (Cionco & Soon 2017; Cionco et al. 2018, 2020; Fedorov 2019b,b; Fedorov & Kostin 2020) and the calculations within the SPI theories described in Section 2.5.3. However, we stress that the two fields of research are distinct. The former field is interested in how the perturbations of the other planetary bodies on the Earth's orbit around the Sun influence the distribution of the incoming TSI reaching the Earth. The latter field is concerned with what effects (if any) the orbits of the various planetary bodies might have on TSI (or more broadly, solar activity) itself. Scafetta et al. (2020)

adds a third possible planetary mechanism that could be influencing the Earth's climate, by arguing that planetary configurations could directly modulate the flux of the interplanetary dust reaching the Earth's atmosphere thereby potentially influencing cloud cover (Scafetta et al. 2020).

In any case, for simplicity, most discussions on the climatic significance of orbital variations have tended to pick a particular latitudinal band and season, e.g., the average insolation during the Northern Hemisphere summer at 65°N. However, as discussed in the quote above from Imbrie (1982), identifying the particular latitude and season whose curve is "most important" is quite subjective. For instance, Huybers & Denton (2008) argue that "the duration of Southern Hemisphere summer is more likely to control Antarctic climate than the intensity of Northern Hemisphere summer with which it (often misleadingly) covaries" (Huybers & Denton 2008). Indeed, Davis & Brewer (2009) argued that a more climatically relevant factor is the "latitudinal insolation gradient (LIG)", which in turn "... creates the Earth's latitudinal temperature gradient (LTG) that drives the atmospheric and ocean circulation" (Davis & Brewer 2009). Note that this latter LTG concept is equivalent to the "EPTG" parameter considered by Lindzen (1994) and Soon & Legates (2013) and comparable to the "meridional heat transfer (MHT)" concept of Fedorov (2019b). Another related index is the zonal index pressure gradient, which Mazzarella & Scafetta (2018) argue is linked to the NAO, LOD and atmospheric temperatures, as well as directly influencing atmospheric circulation patterns (Mazzarella & Scafetta 2018).

Although Davis & Brewer (2009)'s focus was on timescales of millennia (Davis & Brewer 2009), Soon (2009) noted that the variability of the LIG can also be significant on multidecadal-to-centennial timescales (Soon 2009). Therefore, recent work into studying the variability of the LIG (or Fedorov (2019b)'s related "meridional insolation gradient (MIG)" (Fedorov 2019b)) on these shorter timescales (Cionco et al. 2018, 2020; Fedorov 2019b; Davis & Brewer 2011) could be a particularly important "STOF" for understanding recent climate changes.

### 3. Estimating Northern Hemisphere surface temperature changes

As seen from Table 2 there are many different approaches to estimating the Northern Hemisphere surface temperature changes since the 19<sup>th</sup> century (or earlier). As will be discussed in this section, most of the estimates in this table share several key similarities. However, there are also subtle differences between the various estimates. For this reason, we analyze the different categories of Northern Hemisphere temperature variability estimates separately. However, although there are subtle differences within a given category (e.g., land-based estimates using both urban and rural stations) – particularly on a year-to-year basis – there are several dozen time series listed in Table 2. Hence, to simplify our analysis, we will construct an upper and lower bound time series for each of

our five categories. This then provides us with an uncertainty range for each of our estimates. In this section, we describe each of the five categories in Table 2, and how our upper and lower bounds are calculated.

**Table 2.** The different Northern Hemisphere temperature trend datasets analyzed in this study.

Region	Type of measurements	Start	End	Source				
Land	Rural stations only	SCC 2015 weighting	1881	2018		This study		
		Standard weighting	1841	2018		"		
		Equal weighting	1841	2018		"		
		Excluding Arctic	1841	2018		"		
		Excluding US	1841	2018		"		
		Excluding China	1869	2018		"		
		Excluding Ireland	1841	2018		"		
		Land	Urban and rural stations	Standard weighting	1800	2018		This study
				CRUTEM4	1850	2018		<a href="http://www.cru.uea.ac.uk/">http://www.cru.uea.ac.uk/</a>
NOAA NCEI	1880			2018		<a href="https://www.ncdc.noaa.gov/">https://www.ncdc.noaa.gov/</a>		
NASA GISS	1880			2018		<a href="https://climexp.knmi.nl">https://climexp.knmi.nl</a>		
Berkeley Earth	1815			2018		"		
Chinese Meteorological Agency	1900			2018		"		
Cowtan & Way (land mask)	1850			2018		"		
Oceans	SSTs	HadISST	1870	2018		<a href="https://climexp.knmi.nl">https://climexp.knmi.nl</a>		



Region	Type of measurements	Start	End	Source	
	Analysis	HadSST3 – 100 realizations	1850	2018	"
		HadSST4 – 100 realizations	1850	2018	"
		ERSST3	1880	2011	<a href="https://www.ncdc.noaa.gov/">https://www.ncdc.noaa.gov/</a>
		ERSST4	1854	2018	"
		ERSST5	1854	2018	"
Land	Tree-ring based reconstruction	Briffa (2000)	831	1992	<a href="https://www.blogs.uni-mainz.de/fb09climatology/files/2018/06/NH-reconstructions.xlsx">https://www.blogs.uni-mainz.de/fb09climatology/files/2018/06/NH-reconstructions.xlsx</a>
		Esper et al. (2002)	831	1992	"
		D'Arrigo et al. (2006)	831	1995	"
		Schneider et al. (2015)	831	2002	"
		Stoffel et al. (2015)	831	2002	"
		Willson et al. (2016)	831	2002	"
Land	Glacier-length based reconstruction	Leclercq & Oerlemans (2012)	1601	2000	<a href="https://www.ncdc.noaa.gov/paleo-search/study/13544">https://www.ncdc.noaa.gov/paleo-search/study/13544</a>

### 3.1. Using Rural-stations Only

Many researchers have relied on weather station records to estimate Northern Hemisphere (and global) land surface air temperature trends since at least the late-19<sup>th</sup>/early-20<sup>th</sup> century (Soon et al. 2015; Lugina et al. 2006; Hansen et al. 2010; Lenssen et al. 2019; Lawrimore et al. 2011; Muller et al. 2014; Jones et al. 2012; Cowtan & Way 2014; Xu et al. 2018). The results are typically similar and imply an average warming trend of  $\sim 1^\circ \text{C century}^{-1}$  since the late-19<sup>th</sup> century. Thus, most

studies assumed these estimates are robust and well-replicated. Recently, however, Soon et al. (2015) constructed a new estimate using only rural (or mostly rural) stations taken from four regions with a high density of rural stations, and they found that this new estimate yielded noticeably different results.

Soon et al. (2015)'s estimate incorporated more than 70% of the available rural stations with records covering both the early and late 20<sup>th</sup> century. "Rural" was defined in terms of both low night-brightness and low associated population using the urban ratings provided by the dataset. If they are correct that urbanization bias has not been adequately corrected for in the standard estimates, then the Soon et al. (2015) estimate should be more representative of the Northern Hemisphere land surface temperature trends than the standard estimates. McKittrick & Nierenberg (2010), Scafetta & Ouyang (2019) and more recently Scafetta (2021) and Zhang et al. (2021) offer some support for this.

On the other hand, several researchers have claimed that the standard estimates are **not** majorly affected by urbanization bias. Some argue that urbanization bias is only a small problem for global and hemispheric temperature trends, e.g., Jones et al. (1990), Parker (2006), Wickham et al. (2013). Others concede that urbanization bias is a concern for the raw station data, but argue that after statistical homogenization techniques (usually automated) have been applied to the data, most of the nonclimatic biases (including urbanization bias) are removed or substantially reduced, e.g., Peterson et al. (1999), Menne & Williams (2009), Hausfather et al. (2013), Li & Yang (2019), Li et al. (2020b). If either of these two groups is correct, then considering all available station records (urban and rural) should be more representative of the Northern Hemisphere land surface temperature trends.

That said, we note that the methodology and/or justification of each of the above studies (and others reaching similar conclusions) has been disputed, e.g., see Connolly & Connolly (2014a) for a critique of 13 such studies (Connolly & Connolly 2014a). We also recommend reading the review comments of McKittrick who was a reviewer of an earlier version of Wickham et al. (2013) and has made his reviews publicly available at: <https://www.rossmckittrick.com/temperature-data-quality.html>. Also, some of us have argued that these statistical homogenization techniques inadvertently lead to "urban blending" whereby some of the urbanization bias of the urban stations is aliased onto the trends of the rural stations. This means that, counterintuitively, the homogenized station records (whether rural or urban) may often end up less representative of climatic trends than the raw rural station records (Soon et al. 2018, 2019b).

Wie in Soon et al. ( 2015 ) basiert unsere Analyse in diesem Abschnitt auf Version 3 des monatlichen Temperaturdatensatzes des Global Historical Climatology Network (GHCN) der NOAA (Lawrimore et al. 2011 ). Dieser GHCN-Datensatz wurde auch von Hansen et al. verwendet. ( 2010 ) und Lawrimore et al. ( 2011 ) Schätzungen, und es wurde zu einem Hauptbestandteil der Schätzungen von Jones et al. ( 2012 ), Xu et al. ( 2018 ) und Muller et al. ( 2014 ) Schätzungen, die in Abschnitt 3.2 berücksichtigt werden . Alle diese Schätzungen umfassten jedoch sowohl städtische als auch ländliche Stationen.

Version 4 des monatlichen GHCN-Temperaturdatensatzes Soon et al. ( 2015 ). Diese neuere Version bietet eine viel größere Anzahl von Stationen (~20.000 gegenüber 7.200 in Version 3), obwohl die meisten neuen Stationen kurze Stationsaufzeichnungen haben (nur wenige Jahrzehnte) und ~40 % der Stationen nur das angrenzende Vereinigte Königreich abdecken Zustände. Im Gegensatz zu Version 3 enthält dieser neue Datensatz jedoch noch keine Schätzungen darüber, wie urbanisiert die einzelnen Stationen sind. Einige von uns haben damit begonnen, neue Schätzungen der Urbanisierung der Stationen der Version 4 auf regionaler Basis zu entwickeln – siehe Soon et al. ( 2018) für die Ergebnisse für China. Diese Forschung ist noch nicht abgeschlossen und noch nicht abgeschlossen. Da in der Zwischenzeit behauptet wurde, dass die durch die Umstellung auf Version 4 eingeführten Änderungen der langfristigen Trends relativ bescheiden sind (Menne et al. 2018), halten wir es für sinnvoll, die Studie von Soon et al. zu aktualisieren und detaillierter zu betrachten al. ( 2015 ) „überwiegend ländliche“ Temperaturzeitreihen der nördlichen Hemisphäre unter Verwendung von Version 3.

Wir haben ein aktuelles Update des Datensatzes der Version 3 von <https://www.ncdc.noaa.gov/ghcnm/> heruntergeladen [Version 3.3.0.20190821, abgerufen am 21.08.2019]. Dieser Datensatz weist zwei Varianten auf: einen unbereinigten Datensatz, bei dem nur Qualitätskontrollkorrekturen angewendet wurden, und einen angepassten Datensatz, der mithilfe des automatisierten Menne & Williams- Algorithmus ( 2009 ) homogenisiert wurde. Ein Hauptbestandteil des GHCN-Datensatzes ist ein Teilsatz für die angrenzenden Vereinigten Staaten, der als US Historical Climatology Network (USHCN) bezeichnet wird. Als Teil unserer Analyse verwenden wir USHCN-Stationen, die hinsichtlich Time-of-Observation Biases korrigiert wurden (Karl et al. 1986 ), aber nicht der zusätzlichen Menne & Williams ( 2009) unterzogen wurden) Homogenisierungsprozess. Wir haben diesen USHCN-Zwischendatensatz von <https://www.ncdc.noaa.gov/ushcn/introduction> [Version 2.5.5.20190912, abgerufen am 09.12.2019]. In dieser Studie betrachten wir die jährliche Durchschnittstemperatur (im Gegensatz zu monatlichen oder saisonalen Durchschnittswerten) und führen daher die Anforderung ein, Daten für 12 vollständige Monate für ein bestimmtes Jahr bereitzustellen. Um zu definieren, wie die jährlichen Durchschnittstemperaturen für eine bestimmte Station variieren, verwenden wir außerdem den

beliebten Ansatz, jede Temperaturaufzeichnung in eine „Anomaliezeitreihe“ relativ zu einem konstanten Basiszeitraum von 1961 bis 1990 (der 30-Jahres-Basiszeitraum) umzuwandeln mit maximaler Senderabdeckung). Nachdem unsere endgültige hemisphärische Reihe erstellt wurde, werden sie vom Basiszeitraum 1961–1990 auf den Basiszeitraum 1901–2000, also relativ zum 20., neu <sup>skaliert</sup>Jahrhundertdurchschnitt. Damit eine Station in unsere Analyse einbezogen werden kann, muss sie für diesen Zeitraum von 1961 bis 1990 über Daten aus mindestens 15 vollständigen Jahren verfügen. Diese Einschränkungen sind zwar relativ gering, verringern jedoch die Gesamtzahl der Stationen im Datensatz von 7.280 auf 4.822.

Version 3 des GHCN-Datensatzes enthält zwei unterschiedliche Schätzungen darüber, wie urbanisiert jede Station ist. Jeder Station wird eine Flagge mit einem von drei möglichen Werten („Ländlich“, „Halbstädtisch“ oder „Stadt“) zugewiesen, abhängig von der ungefähren Bevölkerungszahl, die mit dem Stationsstandort verbunden ist. Den Stationen wird außerdem ein zweites Flag (ebenfalls mit einem von drei möglichen Werten) entsprechend der Helligkeit der durchschnittlichen Nachtluchtintensität zugewiesen, die mit dem Stationsstandort verbunden ist – siehe Peterson et al. ( 1999 ) für Einzelheiten.

Für sich genommen handelt es sich bei beiden Flaggen eher um grobe und etwas veraltete Schätzungen des Urbanisierungsgrads der Station. Dennoch sind Stationen, die nach *beiden* Flaggen als „ländlich“ kategorisiert werden, in der Regel relativ ländlich, während Stationen, die nach *beiden* Flaggen als „städtisch“ kategorisiert werden, in der Regel stark urbanisiert sind.

Daher ist es *durch die gemeinsame Verwendung beider Flaggen* möglich, die meisten stark ländlichen und stark städtischen Stationen zu identifizieren. Wie oben erwähnt, entwickeln einige von uns derzeit ausgefeiltere und aktuellere Schätzungen der Urbanisierung für Version 4 des GHCN-Datensatzes und des zugehörigen ISTI-Datensatzes, z. B. Soon et al. ( 2018 ). Für diese Studie (die GHCN Version 3 nutzte) folgen wir jedoch dem von Soon et al. vorgeschlagenen Ansatz. ( 2015 ) und unterteilen die Sender in drei Kategorien:

- „Ländlich“ = ländlich gemäß beiden Flaggen (1278 der 4822 Stationen, also 27%)
- „Urban“ = städtisch gemäß beiden Flaggen (1129 der 4822 Stationen, also 23%)
- „Halbstädtisch“ = der Rest der Stationen (2415 der 4822 Stationen, also 50 %).

In diesem Artikel untersuchen wir die nördliche Hemisphäre, die über eine viel größere Datenabdeckung verfügt. Aus Gründen des Kontexts vergleichen wir in Abbildung 6 jedoch auch die Datenverfügbarkeit für beide Hemisphären. Die Gesamtzahl der für jedes Jahr verfügbaren Stationen

(in beiden Hemisphären) ist in Abbildung 6(a) dargestellt . Die Gesamtzahl der Stationen, die die „ländlichen“ Anforderungen erfüllen, ist in Abbildung 6(b) dargestellt . Es ist ersichtlich, dass beide Diagramme im Zeitraum 1961–1990 ein Maximum erreichen, die verfügbaren Daten außerhalb dieses Zeitraums jedoch geringer sind und für das frühe 20. Jahrhundert und früher deutlich niedriger ausfallen . Dies wurde bereits zuvor festgestellt, z. B. Lawrimore et al. ( 2011 ). Wie Soon et al. ( 2015) wies darauf hin, dass das Problem noch verschärft wird, wenn wir die ländliche Teilmenge betrachten, d. h. Abbildung 6(b) . Während 27 % der GHCN-Stationen mit mindestens 15 vollständigen Jahren im optimalen Basiszeitraum 1961–1990 ländlich sind, weisen die meisten dieser ländlichen Stationen tendenziell relativ kurze und/oder unvollständige Stationsaufzeichnungen auf.

**Abb. 6** Verteilung ländlicher Stationen im GHCN-Datensatz (Version 3), der für die Erstellung unserer ländlichen Temperaturreihe in der nördlichen Hemisphäre verwendet wird. (a) Die Gesamtzahl der gültigen Stationen (entweder auf dem Land oder in der Stadt) mit Daten für jedes Jahr. Gültige Stationen verfügten im Zeitraum 1961–1990 mit maximaler Stationsabdeckung über Daten aus mindestens 15 Jahren, wobei ein Jahr aus 12 vollständigen Datenmonaten besteht. (b) Die Gesamtzahl der gültigen Stationen, die gemäß den GHCN-Metadaten sowohl hinsichtlich der Nachthelligkeit als auch der Bevölkerungsdichte als „ländlich“ gelten. (c) Die Standorte der vier Regionen und der ländlichen Stationen in diesen Regionen, die für die Erstellung unserer ländlichen Temperaturreihe auf der nördlichen Hemisphäre verwendet wurden. (d) Die Prozentsätze der verfügbaren ländlichen Daten in diesen vier Regionen für jedes Jahr. (e) Die Prozentsätze der verfügbaren ländlichen Daten im Rest der nördlichen Hemisphäre. (f) Die Prozentsätze der verfügbaren ländlichen Daten in der südlichen Hemisphäre.

These findings are not surprising since it is more challenging to staff and maintain a long and continuous multidecadal record for an isolated rural location than for a well-populated urban location (Soon et al. 2015; Soon et al. 2018; Connolly & Connolly 2014c; Ren & Ren 2011; Ren et al. 2015). This was especially the case before the relatively recent invention of automated weather stations. As a result, the percentage of available stations that are rural is much lower for the earlier periods. For instance, only 454 of the 2163 stations (21%) with data for 1931 and only 300 of the 1665 stations (18%) with data for 1901 are rural, according to our categorization.

A further difficulty is that many of the most rural stations with relatively long station records do not have complete records. The station records might nominally cover a relatively long period, but there will often be large gaps of several years or even decades, and the average annual temperature of the station will often be quite different before and after the gap (Connolly & Connolly 2014a,c,b). For instance, using the same categorization as here, there are eight rural stations in Version 3 of the GHCN dataset for India and all of them cover a relatively long period (i.e., five have at least some data for the late 19<sup>th</sup> century, and two of the station records begin in the first decade of the 20<sup>th</sup> century) (Connolly & Connolly 2014b). However, most of the records contain substantial data gaps – often accompanied by substantial "jumps" in the average annual temperature that suggest a station move or some other non-climatic bias. None of the records is complete enough to *continuously* describe temperature trends from the late 19<sup>th</sup> century to present.

If station histories (often called "station metadata") that indicate documented changes in station location, instrumentation, time of observation, etc., exist then, in many cases, it may be possible to correct the station records for these non-climatic biases – especially if parallel measurements associated with the station change are available (as is becoming more common in recent years). However, unfortunately, station histories are not currently provided with the GHCN dataset.

As mentioned earlier, several groups have argued that by applying statistically-based "homogenization" techniques to the dataset, the homogenization algorithms will accurately detect and correct for the main biases (Peterson et al. 1999; Menne & Williams 2009; Hausfather et al. 2013; Li & Yang 2019; Li et al. 2020b). However, when applied to rural stations utilizing urban neighbors, these techniques are prone to "urban blending", which has a tendency to "alias" urbanization bias onto the rural station records. That is, the homogenization process can contaminate the station records of nominally "rural" stations even if they had been unaffected by urbanization bias *before homogenization* (Soon et al. 2015; Soon et al. 2018, 2019b; Connolly & Connolly 2014a,c,b).

For those reasons, Soon et al. (2015) constructed their estimate, relying on the *non-homogenized* dataset, but only rural (or mostly rural) stations taken from four regions with a high density of rural stations and/or where they had relevant station history information. Here, we will adopt this approach, but updating and slightly modifying the four regions as follows:

- Rural Arctic. The gridded mean average of all 110 rural GHCN stations north of 60°N. Soon et al. (2015) limited their analysis to the Arctic Circle (i.e., north of 66.7°N), which included fewer stations, and, therefore, they also included some urban and semi-urban stations. However, following Connolly et al. (2017), we include only rural stations and have expanded the "Arctic" region to include any stations north of 60°N.

- Rural Ireland. Soon et al. (2015) demonstrated that the adjustments applied by NOAA to the longest rural record for Ireland, Valentia Observatory, were remarkably inconsistent and also failed to identify the  $-0.3^{\circ}\text{C}$  cooling bias introduced by the station's February 2001 move. For this reason, we use the unadjusted rural records for Ireland and manually apply a correction to account for this non-climatic bias. The Soon et al. (2015) composite regarded this manually homogenized Valentia Observatory record as representative of rural Ireland. However, they noted that the other four rural Irish stations in the GHCN dataset also implied similar trends over their period of overlap. Therefore, in this study, we use the gridded mean of all five rural Irish stations.
- Rural United States. Our rural US series is the same as in Soon et al. (2015), except updated to 2018.
- Rural China. Our Chinese series is also the same as in Soon et al. (2015), except updated to 2018. As there are very few rural stations in China with records covering more than  $\sim 70$  years, this component of our analysis does include some stations that are currently urban or semi-urban, but whose station records have been explicitly adjusted to correct for urbanization bias as described in Soon et al. (2015).

The locations of the stations in the four regions are displayed in Figure 6(c). The regions are distributed at different locations in the Northern Hemisphere and include sub-tropical regions (lower United States and China) as well as polar regions (the Arctic). However, none of the regions are in the Southern Hemisphere; thus, this is purely a Northern Hemisphere estimate.

If accurate estimates of the urbanization bias associated with individual station records could be determined and corrected for (as for the Chinese subset), then in principle, this analysis could be expanded to include more of the available GHCN data. This could be particularly promising for some of the longer station records, especially if they have only been modestly affected by urbanization bias. For instance, Coughlin & Butler (1998) estimated that the total urbanization bias at the long (1796-present) Armagh Observatory station in Northern Ireland (UK) was probably still less than  $0.2^{\circ}\text{C}$  by 1996 (Coughlin & Butler 1998). Similarly, Moberg & Bergström (1997) were able to develop urbanization bias corrections for two long records in Sweden (Uppsala and Stockholm) (Moberg & Bergström 1997). Given the variability in urbanization biases between stations, we suggest that attempts to correct records for urbanization bias may require case-by-case assessments along these lines, rather than the automated statistical homogenization techniques currently favored. We encourage more research into expanding the available data in this way, and

some of us are currently working on doing so for some regions with relatively high densities of stations. However, in the meantime, we suggest that the approach described in this paper of only considering rural data is an important first step in overcoming the urbanization bias problem.

As can be seen from Figure 6(d)-(f), the four regions alone account for more than 80% of the rural data for the early 20<sup>th</sup> century from either hemisphere. Therefore, this estimate is more likely to be representative of rural Northern Hemisphere land surface temperature trends than the standard estimates described in Section 3.2 since, in those estimates, most of the additional data comes from stations that are more urbanized. Nonetheless, because the stations are confined to four regions rather than distributed evenly throughout the hemisphere, it is unclear what is the most suitable method for weighting the data from each station. In Soon et al. (2015), weighting was carried out in two stages. For each region, the stations were assigned to  $5^\circ \times 5^\circ$  grid boxes according to latitude and longitude. For each year where data for at least one station exist for a grid box, the temperature anomaly for that grid box was the mean of all the temperature anomalies of the stations in that grid box. However, the surface area of a grid box decreases with latitude according to the cosine of the latitude. Therefore, when calculating the regional average for a given year, the grid boxes with data were weighted by the cosine of the mid-latitude for that box.

Soon et al. (2015) argued that each of the four regions sampled a different part of the Northern Hemisphere and therefore the average of all four regions was more representative of hemispheric trends than any of the individual regional estimates. However, since the samples covered different regions of the Northern Hemisphere, they also weighted the four regions according to the cosine of the mid-latitude of the region. They also confined their time series to the period from 1881 onward, i.e., when all four regions had data. The updated version of this weighting approach is shown in Figure 7(a).

**Fig. 7** Rural Northern Hemisphere temperature series constructed using (a)-(c) three different weighting schemes, or (d)-(g) applying the standard weighting scheme but excluding one of the four regions. (h) plots the mean as well as upper and lower ( $\pm 2\sigma$ ) bounds of the seven alternative versions (a)-(g). The  $\pm 2\sigma$  envelope in (h) is the final time series used for the analysis in this paper. For ease of comparison, the  $y$ -axes in Figs. 7–13, 17 and 18 are all plotted to the same scale, as are the  $x$ -axes except for some of the extended plots including paleoclimate estimates.



Other approaches for weighting the data could be followed instead. One approach would be to give all four regions equal weighting. The results from this "equal weighting scheme" are depicted in Figure 7(c), and we extend this series back to the earliest year in which we have data, i.e., 1841. Another approach is perhaps more conventional – instead of calculating each regional estimate and averaging them together, the hemispheric averages are calculated directly from all available gridded averages (from all four regions) for each year. This is the "standard weighting scheme" shown in Figure 7(b).

It might be argued that one of our four regions could be unusual for some reason and, thereby, might be unrepresentative of the hemispheric trends. For that reason, we also calculate four additional versions of the "standard weighting scheme" in which we only use three of the four regions. These four estimates are shown in Figure 7(d)-(g).

Zwischen den einzelnen Schätzungen bestehen geringfügige Unterschiede. Daher verwenden wir für unsere Analyse in diesem Artikel den Mittelwert sowie die Ober- und Untergrenzen aller sieben Schätzungen. Diese Grenzen werden als Mittelwert der sieben Reihen für jedes Jahr  $\pm 2 \sigma$  berechnet. Dennoch ähneln sich alle sieben Schätzungen im Großen und Ganzen, was bedeutet, dass die Auswirkungen unterschiedlicher Gewichtungsschemata relativ gering sind. Konkret deuten alle Schätzungen darauf hin, dass sich die nördliche Hemisphäre vom Ende des 19. Jahrhunderts bis zur Mitte der 1940er Jahre erwärmt hat; abgekühlt bis Mitte der 1970er Jahre; und dann bis zur Gegenwart erwärmt. Den längeren Schätzungen zufolge gab es auch in der Mitte des 19. Jahrhunderts eine relativ warme Periode. Den ländlichen Daten zufolge ist die aktuelle Warmperiode daher mit den früheren Warmperioden Mitte der 1940er Jahre und möglicherweise Mitte des 19. Jahrhunderts vergleichbar. Obwohl der langfristige lineare Trend einer Erwärmung entspricht, dh es seit dem späten 19. Jahrhundert zu einer globalen Erwärmung gekommen ist, scheint dies hauptsächlich darauf zurückzuführen zu sein, dass das späte 19. Jahrhundert relativ kalt war. Dies unterscheidet sich erheblich von den Schätzungen, die das IPCC (2013) berücksichtigt hat, obwohl es interessanterweise der Analyse von Lansner & Pepke Pedersen (2018) recht ähnlich ist, die auf „geschützten“ Stationen basiert (Lansner & Pepke Pedersen 2018). Ein solches Ergebnis könnte überraschend sein, da in vielen Studien behauptet wurde, dass der Urbanisierungsbias kein Problem für die Schätzung der Lufttemperaturtrends in der nördlichen Hemisphäre darstellt und dass alle landbasierten globalen Temperaturschätzungen nahezu identische Ergebnisse implizieren (Lugina et al. 2006; Hansen et al. 2010); Lenssen et al. 2019; Lawrimore et al. 2011; Muller et al. 2014; Jones et al. 2012; Cowtan & Way 2014; Xu et al. 2018; Jones et al. 1990; Parker 2006; Wickham et al. 2013; Peterson et al. 1999; Hausfather et al. 2013; Li & Yang 2019; Li et al. 2020b; Menne et al. 2018; Jones 2016; Hawkins & Jones 2013). Daher werden im nächsten Unterabschnitt mögliche Gründe für diese Unterschiede bewertet.

### 3.1.1. Ist unsere neue Schätzung nur für den ländlichen Raum besser oder schlechter als die Standardschätzungen, die sowohl städtische als auch ländliche Stationen umfassen?

Peterson et al. ( 1999 ) verglichen die Trends einer Teilmenge nur ländlicher Stationen mit dem gesamten GHCN-Datensatz, argumentierten jedoch, dass die Trends gleichwertig seien, und kamen zu dem Schluss, dass der Urbanisierungsbias ein vernachlässigbares Problem darstelle. Allerdings haben Peterson et al. ( 1999 ) stützte sich auf eine Version des GHCN, die mithilfe eines automatisierten, statistisch basierten Homogenisierungsalgorithmus angepasst wurde, um die Auswirkungen nichtklimatischer Verzerrungen zu reduzieren. Andererseits haben Soon et al. haben argumentiert, dass die aktuellen Homogenisierungsalgorithmen nicht nur eine schlechte Leistung erbringen, wenn sie auf die nicht-klimatischen Verzerrungen im GHCN angewendet werden, sondern dass sie auch unbeabsichtigt zu einer Vermischung der nicht-klimatischen Verzerrungen in verschiedenen Stationen führen (Soon et al. 2015; Soon et al. 2018 ,2019b ). Daher hätte die städtische Mischung nach der Homogenisierung einen Großteil der Urbanisierungstendenz der benachbarten städtischen Stationen auf die von Peterson et al. verwendeten „ländlichen“ Stationen übertragen. ( 1999 ).

Um die Gründe für die Unterschiede zwischen unseren Schätzungen nur für den ländlichen Raum und den Standardschätzungen zu ermitteln, vergleichen wir in Abbildung 8 unsere Schätzung nur für den ländlichen Raum, Abbildung 8(a) , mit drei alternativen Schätzungen, die mit den Standardschätzungen vergleichbar sind. Die Schätzung in Abbildung 8(b) wurde unter Berücksichtigung aller Stationen (ländlich, halbstädtisch oder städtisch) für dieselben vier Regionen berechnet und stützte sich auf die Version des GHCN-Datensatzes, die mithilfe der automatisierten Homogenisierung von Menne & Williams (2009) homogenisiert wurde Algorithmus (Menne & Williams 2009 ). Wie in unserer rein ländlichen Schätzung werden auch USHCN-Stationen hinsichtlich Änderungen des Beobachtungszeitpunkts im homogenisierten GHCN-Datensatz korrigiert (Karl et al. 1986) .). Außer der Homogenisierung durch die NOAA von Menne & Williams ( 2009 ) werden jedoch keine weiteren Versuche zur Korrektur nichtklimatischer Verzerrungen durchgeführt . Beachten Sie, dass diese Serie etwas mehr ländliche Stationen für die USA-Komponente enthält als unsere nur ländliche Serie (295 statt 272), da es im GHCN-Datensatz einige Nicht-USHCN-Stationen für die angrenzenden USA gibt.

**Abb. 8** (a) Unsere ländliche Temperaturreihe in der nördlichen Hemisphäre unter Verwendung nur ländlicher (oder stadtkorrigierter) Stationen aus den vier Regionen. (b) Die äquivalente Temperaturreihe einschließlich aller Stationen aus den vier Regionen, ob

städtisch oder ländlich (jedoch homogenisiert mit der automatischen Homogenisierung von Menne & Williams 2009 (Menne & Williams 2009)). (c) wie für (b), außer dass alle gültigen Stationen der nördlichen Hemisphäre (städtisch und ländlich) verwendet werden. (d) wie für (b), außer dass alle gültigen Stationen aus beiden Hemisphären verwendet werden. Die linearen Trends 1841–2018 für jede Temperaturreihe werden im entsprechenden Feld zusammen mit der zugehörigen  $r^2$ -Statistik für den linearen Trend angezeigt. Zum leichteren Vergleich sind die  $y$ -Achsen in Abb. 7–13, 17 und 18 sind alle im gleichen Maßstab dargestellt, ebenso wie die  $x$ -Achsen, mit Ausnahme einiger der erweiterten Diagramme, die Paläoklimaschätzungen verwenden.

Die Schätzung in Abbildung 8(c) wurde unter Einbeziehung aller GHCN-Stationen der nördlichen Hemisphäre (ländlich, halbstädtisch oder städtisch) und nur unter Verwendung des homogenisierten GHCN-Datensatzes von Menne & Williams (2009) berechnet. Schließlich wird die Schätzung in Abbildung 8(d) wie für Abbildung 8(c) berechnet, mit der Ausnahme, dass es sich um eine globale Schätzung handelt, die alle Stationen aus beiden Hemisphären einschließt.

Betrachten wir nun fünf plausible Einwände, die hinsichtlich der Zuverlässigkeit der Reihe nur für den ländlichen Raum im Vergleich zu den Standardschätzungen erhoben werden könnten:

1. **Könnten die vier Regionen nicht repräsentativ für globale Trends sein?** Der Vergleich von Abbildung 8(a) mit Abbildung 8(c) und Abbildung 8(d) zeigt, dass die Schätzung nur für den ländlichen Raum eine viel geringere Erwärmung impliziert als die Standardschätzungen. Insbesondere impliziert die rein ländliche Schätzung einen langfristigen linearen Trend von nur  $0,41 \text{ }^\circ\text{C Jahrhundert}^{-1}$  für die nördliche Hemisphäre im Zeitraum 1841–2018, was weniger als der Hälfte des entsprechenden Trends nach dem Standardansatz entspricht, d. h.  $0,86 \text{ }^\circ\text{C Jahrhundert}^{-1}$  für die nördliche Hemisphäre, Abbildung 8(c) und  $0,83 \text{ }^\circ\text{C Century}^{-1}$  weltweit, Abbildung 8(d). Eine Möglichkeit könnte sein, dass diese vier Regionen zufälligerweise die Erwärmung für den Rest der nördlichen Hemisphäre (und des Globus) unterschätzen. Wie jedoch aus Abbildung 8(b) hervorgeht, ist der lineare Trend bei Anwendung des Standardansatzes auf diese vier Regionen sogar noch größer ( $0,94 \text{ }^\circ\text{C Century}^{-1}$ ). Mit anderen Worten: Wenn überhaupt, sind es die vier Regionen, die die Erwärmung des Rests der Welt leicht *überschätzen*.
2. **Warum wurde kein automatisierter, statistisch basierter Homogenisierungsalgorithmus wie die Standardschätzungen verwendet, um die Auswirkungen nichtklimatischer Verzerrungen zu reduzieren?** Verschiedene nichtklimatische Verzerrungen in den Daten

müssen korrigiert werden. Allerdings haben Soon et al., wie bereits beschrieben, haben gezeigt solche Algorithmen eine schlechte Leistung erbringen, wenn sie auf die nichtklimatischen Verzerrungen im GHCN angewendet werden, und häufig zu unangemessenen Anpassungen der Daten führen (Soon et al. 2015; Soon et al. 2018, 2019b). Darüber hinaus zeigten sie, dass die Algorithmen unbeabsichtigt zu einer Vermischung der nichtklimatischen Verzerrungen in verschiedenen Stationen führen. Daher argumentieren wir, dass empirisch basierte Homogenisierungsanpassungen (idealerweise unter Verwendung von Informationen zur Stationshistorie) zuverlässiger sind als die statistisch basierten Homogenisierungsanpassungen, derzeit von den meisten Gruppen, z. B. Refs, verwendet werden. (Hansen et al. 2010; Lenssen 2019; Lawrimore et al. 2011; Jones et al. 2012; Cowtan & Way 2014; Xu et al. 2018; Menni et al. 2018; Hawkins & Jones 2013).

### 3. **Warum wurden die ländlichen Sender außerhalb dieser vier Regionen nicht einbezogen?**

Wie aus Abbildung 6 hervorgeht, gibt es im GHCN-Datensatz eine ganze Reihe ländlicher Stationen, die außerhalb der vier Regionen lagen. Konkret gibt es in unseren vier Regionen 503 ländliche Stationen, im Rest der nördlichen Hemisphäre jedoch 455 ländliche Stationen und auf der südlichen Hemisphäre 269. Daher könnte es zunächst den Anschein haben, dass unsere vier Regionen nur 50 % der gesamten ländlichen Daten der nördlichen Hemisphäre und 39 % der globalen ländlichen Daten berücksichtigt haben. Wie jedoch aus Abbildung 6(d)-(f) ersichtlich ist, unsere vier Regionen umfassen den Großteil der verfügbaren ländlichen Daten mit relativ langen Stationsaufzeichnungen. Beispielsweise entfallen auf die vier Regionen mehr als 80 % der ländlichen Stationen beider Hemisphären mit Aufzeichnungen aus dem frühen 20. Jahrhundert. Dies ist kein Zufall, denn Soon et al. (2015) hatte speziell diese vier Regionen als diejenigen identifiziert, die eine relativ hohe Dichte an ländlichen Stationen aufweisen oder für die sie Informationen zur Stationsgeschichte für die Anwendung empirisch basierter Homogenisierungsanpassungen hatten (Soon et al. 2015). Auch wenn es für viele Leser überraschend sein mag, machen diese vier Regionen den Großteil der langfristigen Aufzeichnungen ländlicher Sender aus.

### 4. **Were too few stations used?** The rural-only estimate was constructed from a total of 554 stations (this figure is slightly higher than the 503 mentioned above, due to the non-rural Chinese stations utilized for some of the Chinese component), whereas the Northern Hemisphere estimate in Figure 8(c) relied on 4176 stations and the global estimate in Figure 8(d) incorporated 4822 stations. Moreover, several of the estimates by other groups purport to use even more stations. Indeed, the Berkeley Earth group claims to use ~40 000 stations (Muller et al. 2014) (although most of these stations have station records with fewer than 30

years of data). Therefore, some might argue that the rural-only series differs from the standard estimates because the sample size was too small. However, as discussed in Soon et al. (2015) (in particular their table 6), and argued by Hawkins & Jones (2013), many of the earlier attempts to estimate Northern Hemisphere temperature trends utilized even fewer stations, yet obtained fairly similar results to the latest estimates following the standard approach. In particular, Mitchell (1961) relied on only 119 stations; Callendar (1961) utilized only ~ 350; and Lugina et al. (2006) used 384. Moreover, Jones et al. (1997) calculated that about 50 well-distributed stations should be adequate for determining annual global air temperature trends. Since our composite is for the Northern Hemisphere only, even fewer stations should be needed. Therefore, the differences in trends between the rural-only series and the standard estimates are *not* a result of the smaller number of stations.

5. **Why are the differences most pronounced for the earlier period?** Given that the rate of urbanization has accelerated in recent decades, initially it might be assumed that the differences between urban and rural time series would be greatest for recent decades. However, we remind readers of two factors:

- (i) All the time series in Figure 8 are relative to the 20<sup>th</sup>-century average. This partially reduces the apparent differences between the time series during the 20<sup>th</sup> century.
- (ii) From Figure 6, it can be seen that the GHCN dataset has a relatively high rural composition during the 1951–1990 period. The shortage of rural stations in the standard estimates is most pronounced before (and, to a lesser extent, after) this period. Therefore, counterintuitively, the differences between "rural only" and "urban and rural" tend to be larger before 1951, due to changes in data availability

Nonetheless, some readers might still prefer the standard estimates that incorporate both urban and rural stations. We will discuss these in the next section.

### 3.2. Using Urban and Rural Stations

Figure 9 compares the Northern Hemisphere land-only air temperature trends of seven different estimates calculated following the standard approach, i.e., including both urban and rural stations but applying homogenization procedures such as the Menne & Williams (2009) automated statistical homogenization algorithm or Berkeley Earth's "scalpel" procedure (Muller et al. 2014). Although slight differences exist between the approaches taken by each group, the results are remarkably similar. For comparison, the "all Northern Hemisphere stations" estimate of Figure 8(c) is replicated

here in Figure 9(a), albeit extended back to 1800, and it is very similar to the other six estimates. The striking similarity of all these estimates has been noted by most of the groups when describing their individual estimates, e.g., CRUTEM (Jones et al. 2012), i.e., Figure 9(b); Cowtan and Way (Cowtan & Way 2014), i.e., Figure 9(c); NOAA NCEI (Lawrimore et al. 2011), i.e., Figure 9(d); NASA GISS (Hansen et al. 2010; Lenssen et al. 2019), i.e., Figure 9(e); Berkeley Earth (Muller et al. 2014), i.e., Figure 9(f); and the Chinese Meteorological Administration (Xu et al. 2018), i.e., Figure 9(g).

**Fig. 9** Different estimates of Northern Hemisphere land surface temperatures constructed using all stations (either urban or rural). (a) Our estimate from Fig. 8(c) relying on the GHCN version 3 dataset. (b) The Climate Research Unit's CRUTEM4 estimate. (c) Cowtan & Way's land mask component of HadCRUT4. (d) NOAA National Centers for Environmental Information's estimate. (e) NASA Goddard Institute for Space Studies' estimate. (f) Berkeley Earth's estimate. (g) China Meteorological Administration's C-LST 1.3 estimate. (h) plots the mean and upper and lower ( $\pm 2\sigma$ ) bounds of the seven alternative estimates (a)-(g). The mean and  $\pm 2\sigma$  envelope in (h) are the final time series used for the analysis in this paper. The linear trends for the common period of overlap for all series, 1900–2018, are displayed for all estimates for comparison purposes. Note that this is different from the 1841–2018 linear trends considered in Fig. 8. For ease of comparison, the *y*-axes in Figs. 7–13, 17 and 18 are all plotted to the same scale, as are the *x*-axes except for some of the extended plots using paleoclimate estimates.

The fact that all of these estimates are so similar appears to have led to a lot of confidence within the community that these estimates are very reliable and accurate. As discussed in the previous section, we believe this confidence is unjustified and that the new rural-only estimate is more reliable. Nonetheless, for the sake of argument, and because we appreciate that many readers may disagree with us, we will also carry out our analysis for these "urban and rural"-based estimates.

Although the seven estimates are all remarkably similar, as noted above, slight differences still exist between each of the estimates. Therefore, as before, we use the mean with the upper and lower bounds of all seven estimates. These bounds are calculated as the mean of the seven series for each year  $\pm 2\sigma$  – see Figure 9(h).

### 3.3. Sea Surface Temperatures

One way to potentially bypass the debate over urbanization bias might be to consider ocean surface temperature trends instead of land surface temperature trends. Unfortunately, considerable uncertainties are also associated with the ocean surface temperature data, especially before the 1950s. Before the International Geophysical Year of 1957/1958, available data are quite sparse for the Northern Hemisphere and very sparse for the Southern Hemisphere (Kennedy et al. 2019). Moreover, the methods and instrumentation that were utilized for measuring ocean surface temperatures varied from ship to ship and are often poorly documented (Kent et al. 2017). For this reason, it has been argued that the ocean surface temperature data are less reliable than the land surface temperature data, e.g., Jones (2016). Nonetheless, the ocean data are largely independent of the land surface temperature data – even if some groups have partially reduced this independence by adjusting the ocean surface temperature data to better match the land surface temperature records, e.g., Cowtan et al. (2018).

Two competing sets of measurements for the ocean surface temperature exist. The Marine Air Temperatures (MATs) are based on the average air temperature recorded on the decks of ships. The SSTs are based on the average water temperature near the surface. In some sense, the MAT is more comparable to the Land Surface Air Temperature since they are both measurements of the air temperature near the surface. However, the available MAT records are more limited than the SST records, and it has been suggested that the MATs are more likely to be affected by non-climatic biases, especially the daytime measurements, e.g., Rayner et al. (2003); Kent et al. (2013).

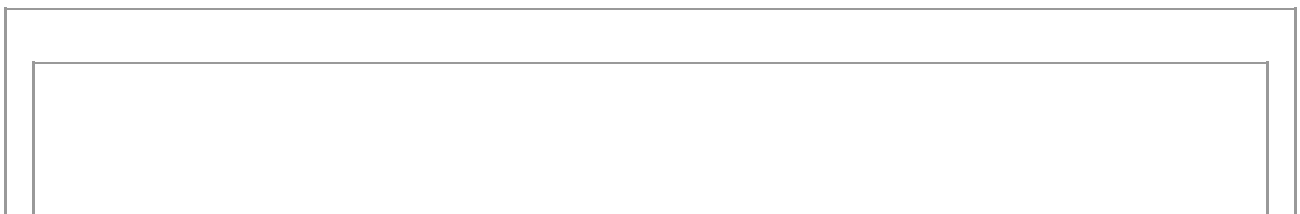
Aus diesem Grund konzentrierten sich die meisten Analysen der Meeresoberflächentemperaturtrends auf die SST-Daten. Der Kürze halber beschränkt sich unsere Analyse der Meeresoberflächentemperatur auf die SST-Daten. Wir empfehlen jedoch weitere Forschung zur Untersuchung beider Arten von Datensätzen und weisen darauf hin, dass sie zu unterschiedlichen Ergebnissen führen können (Rubino et al. 2020) . Doch selbst bei den SST-Daten ist allgemein anerkannt, dass in den Daten wahrscheinlich nichtklimatische Verzerrungen bestehen, insbesondere für die Zeit vor den 1950er Jahren (Jones 2016 ; Kennedy et al. 2019 ; Kent et al. 2017 ; Cowtan et al. 2018 ; Kennedy 2014 ; Davis et al. 2019 ) .

Es ist wahrscheinlich, dass, wenn die wahren Ausmaße und Anzeichen dieser Verzerrungen zufriedenstellend gelöst werden könnten, wie Kent et al. ( 2017 ) gefordert haben, könnte uns dies auch helfen, die Debatten über die Daten zur Landoberflächentemperatur zu lösen. Beispielsweise haben Davis et al. ( 2019 ) festgestellt, dass, wenn man die SST-Messungen, die über „Maschinenraumeinlass“ und die über „Eimer“-Messungen durchgeführt wurden, getrennt analysiert, dies ganz unterschiedliche globale Temperaturtrends im Zeitraum 1950-1975 impliziert.

Insbesondere deuten die „Maschinenraum-Einlassmessungen“ auf einen erheblichen globalen Abkühlungstrend von 1950 bis 1975 hin, der mit unseren ländlichen Schätzungen für Landoberflächentemperaturen in Abschnitt 3.1 übereinstimmt. Interessant, 2018) legt dasselbe nahe. Im Gegensatz dazu deuten die „Eimer“-Messungen auf einen leichten Anstieg im selben Zeitraum hin – im Einklang mit unseren in Abschnitt 3.2 beschriebenen „städtischen und ländlichen“ Schätzungen und auch mit der „nicht geschützten“ Teilmenge von Lansner & Pepke Pedersen (2018).

Derzeit sind drei verschiedene Versionen von SSTs vom Hadley Center erhältlich (HadISST (Rayner et al. 2003), HadSST3 (Kennedy 2014; Kennedy et al. 2011b, a) und HadSST4 (Kennedy et al. 2019)) und drei von der NOAA (ERSST v3 (Smith et al. 2008), v4 (Huang et al. 2015) und v5 (Huang et al. 2017)). Die japanische Wetterbehörde verfügt ebenfalls über eine Version (COBE SST2 (Hirahara et al. 2014)), aber hier beschränkt sich unsere Analyse auf die weiter verbreiteten NOAA- und Hadley Center-Datensätze.

Abbildung 10 vergleicht die verschiedenen SST-Schätzungen der nördlichen Hemisphäre. In Anerkennung der erheblichen Unsicherheiten, die mit der Schätzung der Meeresoberflächentemperaturtrends verbunden sind, hat das Hadley Center dazu übergegangen, Ensembles mehrerer verschiedener plausibler Schätzungen (jeweils 100) für seine beiden neuesten Versionen, d. h. HadSST3, bereitzustellen (Kennedy 2014; Kennedy et al. 2011b), a) und HadSST4 (Kennedy et al. 2019). Die vorherige Version, HadISST (Rayner et al. 2003), und die drei NOAA-Versionen verfolgten diesen Ansatz nicht. Wenn wir daher alle Mitglieder des HadSST3- und HadSST4-Ensembles als separate Schätzungen behandeln würden, würden die anderen vier Datensätze keinen großen Beitrag zu unserer Analyse leisten. Wenn wir andererseits nur die „Median“-Schätzungen aus den Datensätzen HadSST3 und HadSST4 berücksichtigen würden, würden wir die mit diesen Datensätzen verbundenen Unsicherheiten des Hadley Centre unterschätzen. Vor diesem Hintergrund haben wir für beide Datensätze die „untere Realisierung“ und die „obere Realisierung“, also die Unter- und Obergrenzen, extrahiert und diese als vier separate Schätzungen behandelt, die repräsentativ für die in der Kombination enthaltenen Unsicherheiten sind 200 „Ensemble“-Schätzungen der beiden Datensätze – siehe Abbildung 10(b)-(e). Anschließend behandeln wir die andere Version des Hadley Centre, HadISST – siehe Abbildung 10(a) – und die drei NOAA-Schätzungen – siehe Abbildung 10(f)-(h) – als weitere vier unterschiedliche Schätzungen.





**Abb. 10** Verschiedene Schätzungen der Oberflächentemperaturen der nördlichen Hemisphäre, erstellt aus SST-Daten. (a)-(e) Verschiedene vom Hadley Center entwickelte Schätzungen – Einzelheiten siehe Text. (f)-(h). Verschiedene Schätzungen, entwickelt von den NOAA National Centers for Environmental Information (NCEI), früher bekannt als National Climate Data Center (NCDC). (i) stellt den Mittelwert mit Ober- und Untergrenze ( $\pm 2 \sigma$ ) der acht alternativen Schätzungen (a)–(h) dar. Die mittlere  $\pm 2 \sigma$ -Hüllkurve in (i) ist die endgültige Zeitreihe, die für die Analyse in diesem Artikel verwendet wird. Zu Vergleichszwecken werden für jede Schätzung die linearen Trends für den gemeinsamen Überlappungszeitraum aller Reihen, also 1880–2011, aufgeführt. Zum leichteren Vergleich sind die  $y$ -Achsen in Abb. 7 – 13, 17 und 18 sind alle im gleichen Maßstab dargestellt, ebenso wie die  $x$ -Achsen, mit Ausnahme einiger der erweiterten Diagramme, die Paläoklimaschätzungen verwenden.

Damit liegen uns insgesamt acht unterschiedliche Schätzungen vor. Für unsere SST-Analyse verwenden wir den Mittelwert sowie die Ober- und Untergrenzen aller acht Schätzungen. Diese Grenzen werden als Mittelwert der acht Reihen für jedes Jahr  $\pm 2 \sigma$  berechnet. Siehe Abbildung 10(i).

### 3.4. Baumring-Proxy-basierte Rekonstruktionen

Um die Rolle der Sonne bei den Temperaturtrends der nördlichen Hemisphäre vor der Mitte des 19. Jahrhunderts zu beurteilen, muss sich die Analyse größtenteils auf indirekte Schätzungen aus Paläoklima-Rekonstruktionen beschränken, die unter Verwendung von Temperatur-Proxy-Reihen, z. B. Baumringen, entwickelt wurden (Esper et al. 2018).

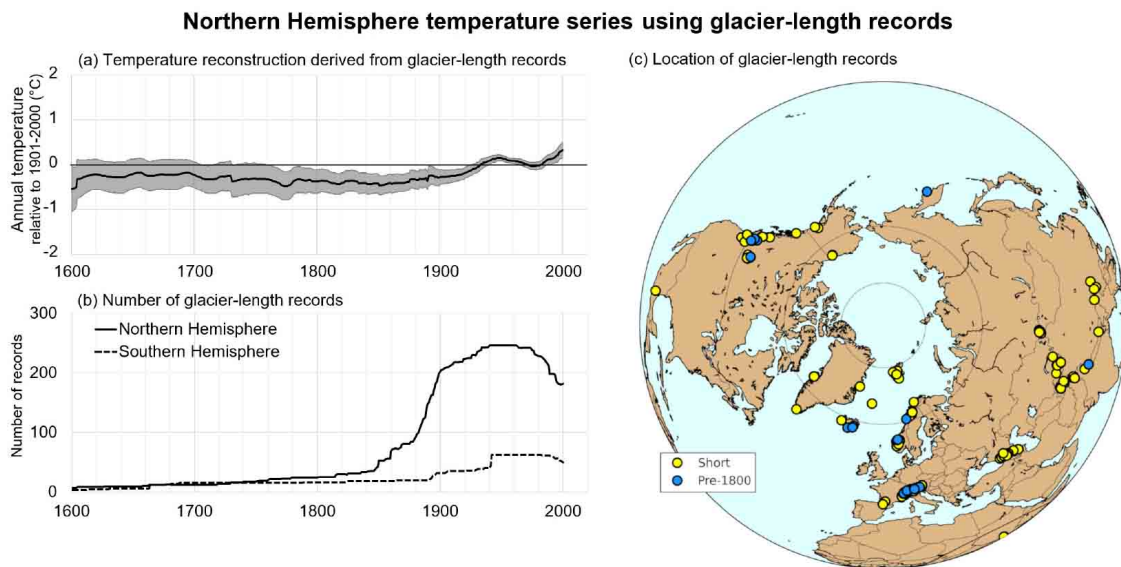
Esper et al. (2018) haben kürzlich sechs verschiedene auf Jahrringen basierende Rekonstruktionen in tausendjähriger Länge für die nördliche Hemisphäre zusammengestellt und überprüft. Abbildung 11 vergleicht die sechs verschiedenen Proxy-basierten Rekonstruktionen der Baumringtemperatur der nördlichen Hemisphäre, die von Esper et al. beschrieben wurden. (2018). Obwohl alle diese Rekonstruktionen teilweise dieselben zugrunde liegenden Baumringdaten aufweisen und weitgehend ähnliche langfristige Temperaturtrends implizieren, haben Esper et al. (2018) betonte, dass jede der Rekonstruktionen leicht unterschiedliche Ergebnisse lieferte. Sie betonten, dass es unangemessen sei, die Rekonstruktionen einfach zu mitteln – ein Punkt, den St. George & Esper (2019) wiederholt. Daher sollte hier jede dieser sechs Rekonstruktionen als eine andere Schätzung behandelt werden. Aus Gründen der Konsistenz mit den übrigen Schätzungen basiert unsere Analyse jedoch auf dem Mittelwert sowie den Ober- und Untergrenzen, die als Mittelwert der sechs Reihen

für jedes Jahr  $\pm 2\sigma$  berechnet werden. Siehe Abbildung 11(g) für den gesamten Zeitraum dieser Schätzungen, der im 9. Jahrhundert beginnt, und Abbildung 11(h) für eine Nahaufnahme der Schätzungen seit Beginn des 19. Jahrhunderts.

**Fig. 11** (a)-(f) Plots of Esper et al. (2018)'s six tree ring-based Northern Hemisphere land surface temperature proxy series. (g) plots the upper and lower ( $\pm 2\sigma$ ) bounds of the six proxy series (a)-(f). (h) is the same as (g) except only covering the most recent 1800–2002 period. The mean and  $\pm 2\sigma$  envelope in (g) and (h) are the final time series utilized for the analysis in this paper. The *solid black line curves* in (a)-(g) and the *solid green upper and lower bounds* in (g) represent the 31-year running averages and are included simply for visual purposes. For ease of comparison, the *y*-axes in Figs. 7–13, 17 und 18 sind alle im gleichen Maßstab dargestellt, ebenso wie die *x*-Achsen, mit Ausnahme einiger der erweiterten Diagramme, die Paläoklimaschätzungen verwenden.

### 3.5. Gletscherlängenbasierte Rekonstruktion

Leclercq & Oerlemans 2012 erstellten einen Datensatz aller verfügbaren multidekadischen Gletscherlängenaufzeichnungen für beide Hemisphären. Anschließend betrachteten sie die Änderungen der Gletscherlänge an jedem dieser Gletscher als Indikator für die lokale Temperatur. Leclercq & Oerlemans lieferten nominell separate Schätzungen für die globalen Temperaturen sowie für jede Hemisphäre. Wie jedoch aus Abbildung 12(b) hervorgeht, betrafen die meisten Daten die nördliche Hemisphäre, also die Hemisphäre, auf die sich unsere Analyse konzentriert. Es ist auch ersichtlich, dass die meisten Gletscherlängenaufzeichnungen im 20. Jahrhundert begannen.



**Abb. 12** (a) Der Mittelwert mit Ober- und Untergrenze der Temperaturrekonstruktion der nördlichen Hemisphäre von Leclercq & Oerlemans ( 2012 ), abgeleitet aus Gletscherlängenaufzeichnungen (Leclercq & Oerlemans 2012 ). (b) Die Anzahl der Gletscherlängenaufzeichnungen, die für beide Hemisphären im Laufe der Zeit verfügbar sind. (c) Lage der Gletscher, die Leclercq & Oerlemans ( 2012 ) für ihre Rekonstruktion der nördlichen Hemisphäre berücksichtigt haben. *Die Datensätze mit Daten vor 1800 sind mit einer blauen Füllung gekennzeichnet* . Zum leichteren Vergleich sind die  $y$ -Achsen in Abb. 7 – 13 , 17 und 18 sind alle im gleichen Maßstab dargestellt, ebenso wie das  $x$ -Achsen, mit Ausnahme einiger erweiterter Diagramme, die Paläoklimaschätzungen verwenden.

Dennoch verfügten sie über einige Daten für beide Hemisphären, die den gesamten Zeitraum 1600–2000 abdeckten, obwohl die von Leclercq & Oerlemans ( 2012 ) bereitgestellten Fehlerbalken recht beträchtlich sind, insbesondere für die Zeit vor dem 20. Jahrhundert · Wir werden den Mittelwert mit Ober- und Untergrenze aus der Rekonstruktion der nördlichen Hemisphäre von Leclercq & Oerlemans ( 2012 ) als unsere Schätzungen behandeln – siehe Abbildung 12(a) .

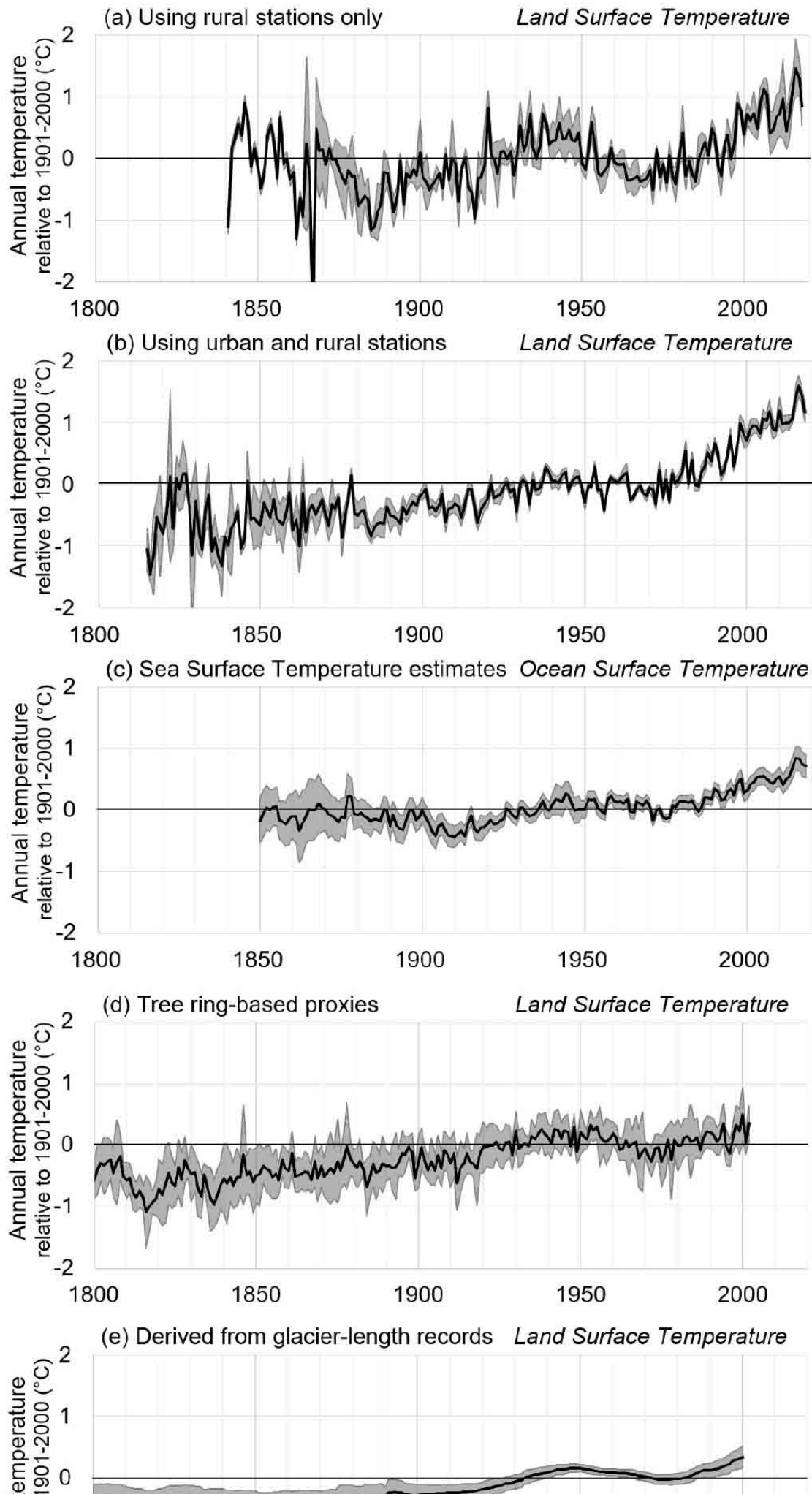
### 3.6. Vergleich aller fünf Schätzungsarten

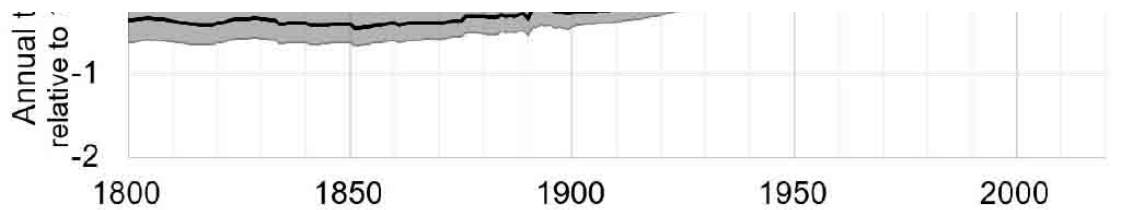
In Abbildung 13 vergleichen und kontrastieren wir die fünf verschiedenen Schätzungen der Temperaturtrends der nördlichen Hemisphäre seit dem 19. Jahrhundert (aus Gründen der Klarheit präsentieren wir in dieser Abbildung nur die Daten nach dem 18. Jahrhundert für unsere beiden längeren, auf Proxys basierenden Schätzungen). Die meisten Schätzungen weisen wesentliche Gemeinsamkeiten auf, insbesondere

- Sie alle deuten darauf hin, dass die aktuellen Temperaturen höher sind als am Ende des 19. Jahrhunderts , das heißt, dass seit dem Ende des 19. Jahrhunderts eine gewisse Erwärmung stattgefunden hat .
  
- Mitte des 20. Jahrhunderts gab es eine „ Warmperiode des frühen 20. Jahrhunderts“ (ECWP) , die ihren Höhepunkt irgendwann in den 1930er bis 1950er Jahren erreichte, gefolgt von mehreren Jahrzehnten *entweder* einer Abkühlung *oder* einer fehlenden Erwärmung.
  
- Von Ende der 1970er Jahre bis zum Ende des 20. Jahrhunderts gab es eindeutig eine Erwärmungsperiode . Einige Schätzungen deuten darauf hin, dass diese Erwärmung bis heute anhält, obwohl es in der Literatur einige Debatten darüber gibt, ob es nach dem Ende des 20. Jahrhunderts eine „Erwärmungspause“ gegeben hat und wenn ja, ob diese Pause beendet ist.



### Northern Hemisphere annual temperature estimate ranges





**Abb. 13** Unterschiedliche Schätzungen der Oberflächentemperaturtrends der nördlichen Hemisphäre seit dem 19. Jahrhundert . Zum leichteren Vergleich sind die  $y$ -Achsen in Abb. 7 – 13 , 17 und 18 sind alle im gleichen Maßstab dargestellt, ebenso wie die  $x$ -Achsen, mit Ausnahme einiger der erweiterten Diagramme, die Paläoklimaschätzungen verwenden.

Es bestehen jedoch geringfügige Unterschiede zwischen den verschiedenen Schätzungen, darunter:

- Die zeitliche Abfolge der verschiedenen Erwärmungs- und Abkühlungsperioden lässt darauf schließen, dass die meisten Schätzungen darauf hindeuten, dass der ECWP in den 1940er Jahren seinen Höhepunkt erreichte, während die baumringbasierten Proxy-Schätzungen auf einen späteren Höhepunkt in den 1950er Jahren schließen lassen.
- Die genauen Größenordnungen der verschiedenen Erwärmungs- und Abkühlungsperioden, z. B. die Schätzungen, die sowohl städtische als auch ländliche Stationen verwenden, deuten auf einen größeren langfristigen Erwärmungstrend hin und darauf, dass die Erwärmung fast vollständig kontinuierlich war, während die anderen Schätzungen einen differenzierteren Wechsel dazwischen implizieren multidekadische Erwärmungs- und Abkühlungsperioden.
- Die beiden Proxy-basierten Schätzungen implizieren eine stärker gedämpfte multidekadische Temperaturvariabilität als die instrumentellen Schätzungen. Dies ist nicht überraschend, wenn man bedenkt, dass sie auf indirekten Schätzungen der Temperaturvariabilität und nicht auf direkten Temperaturmessungen basieren. Während beispielsweise die Gletscherlänge sicherlich von der lokalen Lufttemperatur während der Schmelzsaison (also im Sommer) beeinflusst wird, werden sie auch von Winterniederschlägen beeinflusst (also davon, wie viel Schnee sich während der Wachstumsaison ansammelt). Tatsächlich stellen Roe und O'Neal ( 2009 ) fest, dass Gletscher im Prinzip ohne nennenswerten Klimawandel um Kilometer vor- oder zurückgehen können, sondern einfach aufgrund der jährlichen Schwankungen des lokalen Wetters (Roe & O'Neal 2009 ) . . In ähnlicher Weise haben García-Suárez et al. ( 2009 ) argumentieren, dass Baumring-Proxys oft Proxys für mehrere verschiedene Klimavariablen sowie die Temperatur sind, z. B. Sonnenschein, Niederschlag, Bodenfeuchtigkeit usw., und auch meist die Bedingungen während der Vegetationsperiode widerspiegeln (García-Suárez et al. 2009 ) . . Daher kann es schwierig sein, ein reines „Temperatur“-Signal zu extrahieren

(García-Suárez et al. 2009 ). In der Zwischenzeit stellt Loehle ( 2009 ) fest, dass selbst bei Baumring-Proxys aus „temperaturbegrenzten Regionen“ (in der Regel entweder Standorte in hohen Breitengraden oder in großer Höhe) die Wachstumsraten noch von anderen Faktoren beeinflusst werden können und dass die Beziehung zwischen den Temperaturen der Vegetationsperiode und dem Jahrringwachstum nichtlinear sein (Loehle 2009 ).

Es ist plausibel, dass einige (oder sogar alle) dieser Unterschiede auf nichtklimatische Verzerrungen in einer oder mehreren (und vielleicht allen) Zeitreihen zurückzuführen sind. Allerdings können einige (oder sogar alle) auftreten, weil jede Zeitreihe einen etwas anderen Aspekt der wahren Klimavariabilität erfasst, z. B. kann sich die Variabilität der Meeresoberflächentemperatur geringfügig von der Variabilität der Landoberflächentemperatur unterscheiden.

Auf jeden Fall ist es wichtig, diese nuancierten Unterschiede für unsere Analyse zu berücksichtigen, da wir den Einfluss der Variabilität der Sonne auf die Temperaturtrends der nördlichen Hemisphäre mithilfe einer relativ einfachen linearen Anpassung der kleinsten Quadrate zwischen einer bestimmten Temperaturschätzung und jeder unserer 16 abschätzen werden. Schätzungen der solaren Variabilität, die wir in Abschnitt 2.4 besprochen haben. Der Erfolg der Anpassungen hängt weitgehend von den linearen Korrelationen zwischen den Zeitpunkten und Größen der verschiedenen Anstiege und Abfälle in den anzupassenden Zeitreihen ab. Aus diesem Grund schlagen wir vor, die verschiedenen Kategorien der Temperaturvariabilitätsschätzungen der nördlichen Hemisphäre getrennt zu analysieren. Unsere Anpassungen werden für jede der 16 Schätzungen der solaren Variabilität sowohl für die Ober- als auch für die Untergrenze separat wiederholt. Dies liefert uns dann einen Unsicherheitsbereich für jede unserer Schätzungen.

#### 4. Veränderungen der „anthropogenen Antriebe“

Der Hauptschwerpunkt dieser Arbeit liegt auf der Betrachtung der Rolle der solaren Variabilität bei den Temperaturtrends der nördlichen Hemisphäre seit dem 19. Jahrhundert . Wie in der Einleitung erläutert, argumentierte der IPCC AR5 jedoch, dass der dominierende Treiber globaler (und hemisphärischer) Temperaturtrends seit mindestens der Mitte des 20. Jahrhunderts „ anthropogene Antriebe“ seien (Bindoff et al. 2013 ).

Daher sollten wir auch die Rolle „anthropogener Antriebe“ mit der des „solaren Antriebs“ (dh Änderungen der TSI) vergleichen. Da wir jedoch 16 verschiedene TSI-Schätzungen (Abschn. 2.4 ) und fünf verschiedene Sätze von Schätzungen der Temperaturtrends der nördlichen Hemisphäre (Abschn. 3 ) identifiziert haben, stehen uns bereits 80 ( $5 \times 16$ ) verschiedene Kombinationen zur Auswahl. Aus diesem Grund haben wir der Einfachheit halber den Ansatz gewählt, eine einzelne Zeitreihe als repräsentativ für „anthropogene Antriebe“ auszuwählen.



Gemäß den RCP-Szenarien (Meinshausen et al. 2011), die vom IPCC AR5 (IPCC 2013b) und Anhang II des AR5 verwendet wurden, sind die wichtigsten „anthropogenen Antriebe“ seit dem 19. Jahrhundert: (1) ein Erwärmungsantrieb durch zunehmendes atmosphärisches CO<sub>2</sub> und (2) einen Abkühlungseffekt durch steigende stratosphärische Aerosolkonzentrationen. Sie umfassen jedoch auch mehrere andere „anthropogene Antriebe“, beispielsweise Veränderungen anderer Treibhausgase wie Methan und Lachgas. Kürzlich haben Connolly et al. (2020) eine Aufschlüsselung der Beziehung zwischen sich ändernden Konzentrationen dieser drei Treibhausgase durchgeführt, einschließlich eines Vergleichs der RCP-Szenarien mit anderen Szenarien. Der Einfachheit halber definieren wir in diesem Artikel jedoch „anthropogene Antriebe“ für jedes Jahr als die jährliche Summe aller einzelnen anthropogenen Antriebe in den historischen Antrieben des RCP-Datensatzes von 1765 bis 2005 und erweitern diese Zeitreihe bis zu 2018 anhand des Szenarios „RCP 6.0“. In einer Version der historischen Antriebe und RCP-Szenarien wurden alle anthropogenen Antriebe in CO<sub>2</sub>-äquivalente Konzentrationen umgerechnet. Daher betrachten wir diese „CO<sub>2</sub>-Äquivalent“-Zeitreihe. Die Zeitreihe ist in Abbildung 14 dargestellt als durchgezogene rote Linie, zusammen mit den entsprechenden Trends des atmosphärischen CO<sub>2</sub> allein als schwarze gestrichelte Linie. Es ist ersichtlich, dass beide Zeitreihen weitgehend ähnlich sind, der „gesamte anthropogene Antrieb“ jedoch für Teile des späten 19. und 20. Jahrhunderts geringfügig von der reinen CO<sub>2</sub>-Zeitreihe abweicht. Wir stellen fest, dass im Gegensatz zu den Datensätzen zu anthropogenen Antrieben, die für frühere IPCC-Berichte verwendet wurden, die Daten von Meinshausen et al. (2011) Der „gesamte anthropogene Antrieb“ scheint in den 1940er Jahren eine leichte „Beule“ zu umfassen, gefolgt von einem leichten Tal in den 1950er Jahren (Meinshausen et al. 2011).

**Fig. 14** Comparison of the Total Anthropogenic Forcings dataset used in this study (*red solid line*) in units of CO<sub>2</sub>-equivalent atmospheric concentrations vs. atmospheric CO<sub>2</sub> concentrations (*dashed black line*) (ppmv). Both time series are taken from Meinshausen et al.'s (2011) Representative Concentration Pathways (RCP) datasets. 1765–2005 corresponds to the "historical forcing" data, while the 2006–2018 extension is taken from the "RCP6.0" scenario, but similar results are found for the other two scenarios that assume a continuous increase in anthropogenic forcing over the 21<sup>st</sup> century, i.e., RCP4.5 and RCP8.5.

## 5. Estimating the role of the Sun in Northern Hemisphere surface temperature trends since the 19th century and earlier

As indicated by the title of this article, in this study, we are attempting to estimate how much of a role solar variability has had on Northern Hemisphere temperature trends. However, to do this, we need to know how solar output (i.e., TSI) and Northern Hemisphere temperatures have changed. In Section 2.4, we compiled sixteen different estimates of TSI trends covering the same period – summarized graphically in Figures 2 and 3. In Section 3, we compiled five different estimates of Northern Hemisphere surface temperature trends since the 19<sup>th</sup> century (or earlier) – summarized graphically in Figure 13. Therefore, we now have 80 (i.e.,  $16 \times 5$ ) different, but plausible, combinations of our various estimates of the trends in TSI and of Northern Hemisphere temperature trends. Meanwhile, in Section 4, we summarized the trends of "total anthropogenic forcings" in terms of a single time series derived from the sum of the various individual "anthropogenic forcings" considered in the "RCP" scenarios (Meinshausen et al. 2011) as incorporated in the IPCC's AR5 (IPCC 2013a) – summarized graphically in Figure 14.

Given the huge range of plausible combinations to be considered, we have chosen to take a relatively simple statistical approach to answer this question. Specifically,

1. Für jede der 80 Kombinationen werden die besten linearen kleinsten Quadrate zwischen den Temperaturen der nördlichen Hemisphäre und dem TSI für den maximalen gemeinsamen Überlappungszeitraum zwischen den Zeitreihen ausgewertet. Im Fall der beiden längsten Temperaturreihen der nördlichen Hemisphäre (d. h. der von Gletschern abgeleiteten und von Jahrringen abgeleiteten Proxy-Reihen) wird 1765 als Ausgangspunkt angesehen, da dies den Beginn der Zeitreihe der „anthropogenen Antriebe“ markiert.
2. Der „solare Beitrag“ zu den Temperaturtrends der nördlichen Hemisphäre wird als der Prozentsatz des langfristigen Temperaturtrends definiert, der anhand dieser linearen Solaranpassung nach der Methode der kleinsten Quadrate erklärt werden kann. Es werden Anpassungen für die oberen und unteren Grenzen jeder Temperaturreihe der nördlichen Hemisphäre sowie für den Mittelwert durchgeführt, und die niedrigsten und höchsten Werte dieser beiden Anpassungen werden als untere und obere Grenzen unserer Schätzungen des „Sonnenbeitrags“ dargestellt.
3. Anschließend berechnen wir die statistischen Residuen, die nach Subtraktion der solaren Anpassungen von der Temperaturreihe verbleiben (dh die ungeklärte Variabilität der Temperaturreihe).

4. Anschließend berechnen wir die besten linearen Anpassungen nach der Methode der kleinsten Quadrate zwischen diesen Residuen und der Zeitreihe „Gesamtanthropogener Antrieb“ (dh der in Abb. 14 dargestellten ).
5. Wir definieren den „anthropogenen Beitrag“ zu den Temperaturtrends der nördlichen Hemisphäre als den Prozentsatz des langfristigen Temperaturtrends, der durch diese lineare Anpassung der kleinsten Quadrate an die Residuen erklärt werden kann.
6. Anschließend wird die Summe dieser beiden Beiträge zum Trend der ursprünglichen Temperaturreihe der nördlichen Hemisphäre ausgewertet. Wenn die Summe weniger als 100 % beträgt, deutet dies darauf hin, dass neben dem solaren und anthropogenen Antrieb noch eine zusätzliche Komponente erforderlich ist, um den Rest des Trends zu erklären. Wie wir sehen werden, ist die Summe jedoch oft größer als 100 %. Dies würde darauf hindeuten, dass eine oder beide Komponenten überschätzt werden und/oder dass eine ungeklärte Komponente der „globalen Abkühlung“ fehlt, die weder solar ist noch Teil der anthropogenen Antriebe ist.

Wir betonen, dass dies ein relativ einfacher Ansatz zur Schätzung der relativen Beiträge von „solaren“ und „anthropogenen Antrieben“ zu den Temperaturtrends der nördlichen Hemisphäre ist. Für diese Analyse gehen wir ausdrücklich davon aus, dass ein direkter linearer Zusammenhang zwischen eingehendem TSI und den Oberflächentemperaturen der nördlichen Hemisphäre besteht. Wie jedoch in den Abschnitten 2.5 und 2.6 erläutert , gibt es viele Hinweise darauf, dass die Beziehungen zwischen Sonnenaktivität und dem Erdklima nichtlinear und viel subtiler sind. Diese vereinfachende Annahme einer direkten linearen Beziehung berücksichtigt insbesondere nicht: etwaige „Top-Down“- oder „Bottom-Up“-Mechanismen (Abschn. 2.6.1 ); Ozeanpufferung (Abschn. 2.6.2); die Möglichkeit, dass Sonnen-/Klimaeffekte regional variieren könnten (Abschn. 2.6.3 ); GCR-gesteuerte Verstärkungsmechanismen (Abschn. 2.6.4 ); oder kurzfristige orbitale Variabilität (Abschn. 2.6.5 ). Das Ziel dieser Analyse besteht nicht darin, diese differenzierteren Ansätze zur Untersuchung der Beziehungen zwischen Sonne und Klima zu verwerfen. Tatsächlich haben viele von uns zu der in den Abschnitten 2.5 – 2.6 besprochenen Literatur beigetragen , und wir planen, weitere Forschungen in diesen Richtungen durchzuführen. Vielmehr möchten wir betonen, dass, wie wir gleich sehen werden, auch mit diesem Ansatz eine überraschend große Bandbreite an Ergebnissen zu finden ist. Als Forscher, die aktiv an der Lösung dieser Probleme interessiert sind, empfinden wir diese große Bandbreite an plausiblen Ergebnissen als beunruhigend.

Wir möchten auch betonen, dass wir durch die Anpassung der anthropogenen Antriebe an die Residuen nach der Anpassung der Daten an TSI implizit den solaren Beitrag im Verhältnis zum anthropogenen Beitrag maximieren. Dies lässt sich beispielsweise anhand des Vergleichs und der Gegenüberstellung der beiden unterschiedlichen Anpassungsansätze von Soon et al. erkennen. (2015) in ihrem Abschnitt 5.1. Das heißt, sie fanden einen größeren solaren Beitrag, als sie die Daten zuerst an TSI anpassten, und einen größeren anthropogenen Beitrag, als sie die Daten zuerst an anthropogene Antriebe anpassten. Vor diesem Hintergrund könnte man argumentieren, dass die verschiedenen Beiträge gleichzeitig geschätzt werden sollten, z. B. mithilfe einer multilineareren Regressionsanalyse oder eines Energiebilanzmodells oder eines allgemeinen Zirkulationsmodells. Tatsächlich haben mehrere von uns in der Vergangenheit solche Analysen durchgeführt (Soon et al. 1996, 2000b; Scafetta 2009; Harde 2017) und planen auch ähnliche Ansätze für zukünftige Forschungen. Wir weisen jedoch darauf hin, dass es einen Unterschied zwischen den TSI-Schätzungen gibt, die anhand empirischer Messungen (z. B. Satellitenmessungen) kalibriert werden, und anthropogenen Antrieben, die normalerweise anhand theoretischer Modellierungen berechnet werden. Das heißt, es handelt sich nicht unbedingt um direkt vergleichbare „Antriebe“.

Unter Berücksichtigung dieser Vorbehalte präsentieren wir in den Abbildungen 15 und 16 die besten Anpassungen für die acht TSI-Schätzungen mit „geringer Variabilität“ (Abb. 15) und die acht TSI-Schätzungen mit „hoher Variabilität“ (Abb. 16) in Bezug auf den Mittelwert Schätzungen der fünf Temperaturdatensätze der nördlichen Hemisphäre. Die entsprechenden Anpassungen an die Ober- und Untergrenzen finden Sie im Microsoft Excel-Datensatz in den Zusatzmaterialien sowie einige zusätzliche Details zu den statistischen Anpassungen usw. Der Kürze halber konzentrieren wir uns hier jedoch auf einige der Hauptergebnisse.

**Fig. 15** The best linear least-squares fits to the five Northern Hemisphere temperature datasets of Fig. 13 in terms of each of the eight "Low solar variability" TSI datasets from Fig. 2 and the "anthropogenic forcings" time series of Fig. 14. As described in the text, each of the temperature time series was first fit to the TSI time series over the maximum period of overlap of the two time series (starting in 1765 at the earliest). The residuals were then fit to the anthropogenic forcings time series. The linear temperature trends are plotted as the *blue bars* auf der Linken. Neben diesen Balken sind die linearen Temperaturtrends der kombinierten „solaren plus anthropogenen“ Anpassungen dargestellt, jedoch aufgeteilt in die linearen Trends der beiden Komponenten. Dargestellt sind die Prozentsätze der beobachteten linearen Trends, die durch die solare Komponente, die anthropogene Komponente und die kombinierte Anpassung erklärt werden können. Beachten Sie, dass

der Prozentsatz der kombinierten Anpassungen häufig größer oder kleiner als 100 % ist und dass die Summe der beiden Komponenten nicht immer der kombinierten Anpassung entspricht.

**Abb. 16** Die besten linearen Anpassungen der kleinsten Quadrate an die fünf Temperaturdatensätze der nördlichen Hemisphäre in Abb. 13 in Bezug auf jeden der acht TSI-Datensätze „Hohe Sonnenvariabilität“ aus Abb. 3 und die Zeitreihe „anthropogener Antrieb“ in Abb. 16. 14 . Wie im Text beschrieben, wurde jede der Temperaturzeitreihen zunächst über den maximalen Überlappungszeitraum der beiden Zeitreihen (frühestens beginnend im Jahr 1765) an die TSI-Zeitreihe angepasst. Die Residuen wurden dann an die Zeitreihe der anthropogenen Antriebe angepasst. Die linearen Temperaturtrends werden als *blaue Balken dargestellt* auf der Linken. Neben diesen Balken sind die linearen Temperaturtrends der kombinierten „solaren plus anthropogenen“ Anpassungen dargestellt, jedoch aufgeteilt in die linearen Trends der beiden Komponenten. Angezeigt werden die Prozentsätze der beobachteten linearen Trends, die durch die solare Komponente, die anthropogene Komponente und die kombinierte Anpassung erklärt werden können. Beachten Sie, dass der Prozentsatz der kombinierten Anpassungen häufig größer oder kleiner als 100 % ist und dass die Summe der beiden Komponenten nicht immer der kombinierten Anpassung entspricht.

Jede der TSI-Schätzungen deckt einen etwas anderen Zeitraum ab (siehe Tabelle 1 ), ebenso wie die Temperaturdatensätze der nördlichen Hemisphäre. Daher variieren die analysierten linearen Perioden für jede der 80 Kombinationen ein wenig. Der genaue Zeitraum ist über den entsprechenden Balkendiagrammen angegeben. Für jede Kombination der lineare Temperaturtrend über den relevanten Zeitraum (in  $^{\circ}\text{C}$  Jahrhundert $^{-1}$ ) wird durch einen einzelnen Balken (blau gefärbt) angezeigt. Daneben sind die gestapelten Doppelbalken für die entsprechenden linearen Kleinst-Quadrate-Anpassungen. Die Höhe der gestapelten Balken stellt den linearen Temperaturtrend der kombinierten „solaren plus anthropogenen“ Anpassungen dar und kann direkt mit dem beobachteten Trend verglichen werden. In manchen Fällen ist dieser Wert größer als der beobachtete Trend (d. h.  $>100\%$ ). Das heißt, dieser kombinierte lineare Trend überschätzt den beobachteten linearen Trend, was darauf hindeutet, dass entweder die anthropogene und/oder die

solare Komponente überschätzt wird. In anderen Fällen liegt der Wert unter dem beobachteten Trend (d. h.  $<100\%$ ), was darauf hindeutet, dass möglicherweise andere Faktoren als der solare oder anthropogene Antrieb beteiligt waren.

Auf der rechten Seite der gestapelten Balken ist der Prozentsatz des beobachteten Temperaturtrends aufgeführt, der durch die solare und anthropogene Komponente erklärt werden kann. Es ist zu beachten, dass die Summe dieser Prozentsätze nicht immer dem Wert der kombinierten Anpassung entspricht. Beispielsweise ist die kombinierte Passform für Matthes et al. ( 2017 ) TSI-Schätzung für die städtische und ländliche Temperaturreihe, d. h. Abbildung 15(e) , erklärt 102 % des beobachteten Trends, aber einzeln erklärt die solare Komponente nur 21 % und die anthropogene Komponente nur 62 %. Für Wang et al. ( 2005 ) Schätzung erklärt die kombinierte Anpassung an die rein ländliche Reihe 119 % des beobachteten Trends, aber die Summe der solaren und anthropogenen Anpassungen ergibt 122 % des beobachteten Trends. Einige dieser offensichtlichen Inkonsistenzen sind auf Rundungsfehler zurückzuführen. Meistens ist dies jedoch darauf zurückzuführen, dass weder die Temperaturtrends auf der Nordhalbkugel noch die modellierten Beiträge streng linear sind. Daher können lineare Anpassungen nach der Methode der kleinsten Quadrate die beobachteten Trends nur annähern, und wir weisen darauf hin, dass die Ergebnisse dieser Analyse ausdrücklich unter Berücksichtigung dieser Einschränkung behandelt werden sollten. Nichtsdestotrotz können uns die Ergebnisse eine vernünftige Schätzung darüber geben, welche Kombinationen die größte und geringste Rolle für die solare Variabilität bei den Temperaturtrends der nördlichen Hemisphäre spielen.

Im Hinblick auf die kleinste Rolle der Sonne impliziert die „SSN“-Schätzung von Svalgaard ( 2014 ) , d Das 19. Jahrhundert wurde durch die Variabilität der Sonne vorangetrieben. Bei dieser TSI-Schätzung handelt es sich im Wesentlichen um eine neu skalierte Version der SSN-Zeitreihe. Dies ist für diejenigen Leser erwähnenswert, die glauben, dass der SSN-Datensatz perfekt mit dem TSI-Datensatz korreliert. Wäre dies der Fall, wäre die Antwort auf die im Titel unseres Artikels gestellte Frage einfach „nichts“. Aber wie in Abschnitt 2 besprochen , scheinen bei der Schätzung des TSI weitaus mehr Faktoren zu berücksichtigen zu sein als die „Sonnenfleckenzahlen“.

Wie in der Einleitung erwähnt, kam das UN IPCC in seinem AR5 (IPCC 2013a ) zu dem Schluss, dass „ **es äußerst wahrscheinlich ist** , dass der menschliche Einfluss die Hauptursache für die beobachtete Erwärmung seit der Mitte des 20. Jahrhunderts war “. Die folgende Analyse gibt Einblicke in den Ursprung dieser bemerkenswerten Schlussfolgerung. Wie aus Tabelle 1 hervorgeht – und wie in Soon et al. ( 2015 ) – alle vier TSI-Schätzungen, die von den CMIP5-Klimamodellierungsgruppen für die dem IPCC AR5 vorgelegten Hindcasts berücksichtigt wurden, sind:

1. Wang et al. ( 2005 )

2. Krivova et al. ( 2007 ); ( 2010 ) (Krivova et al. 2010 )
3. Steinhilber et al. ( 2009 )
4. Vieira et al. ( 2011 ).

Die Anpassungsergebnisse für diese vier Schätzungen sind jeweils in Abbildung 15(a) bis (d) dargestellt . Die langfristigen Trends seit dem 17. Jahrhundert für jede dieser Reihen sind in Abbildung 2(a) bis (d) in ähnlicher Weise dargestellt. Mit Ausnahme von Steinhilber et al. ( 2009 ) deuten alle Schätzungen tatsächlich darauf hin, dass die langfristigen Trends der nicht auf Proxys basierenden Temperaturreihen durch anthropogene Antriebe dominiert wurden. Beispielsweise für Wang et al. ( 2005 ) Schätzungen zufolge können nur 22 % der ländlichen Trends durch solare Variabilität erklärt werden, und es ist möglich, 100 % des linearen Trends durch anthropogene Einflüsse zu erklären – siehe Abbildung 15(a) .

Wir können sehen, dass die neuen Matthes et al. ( 2017 ) Schätzung, die den CMIP6-Modellierungsgruppen empfohlen wurde (Matthes et al. 2017 ) , liefert sehr ähnliche Ergebnisse und deutet eher auf einen noch geringeren solaren Beitrag hin – Abbildung 15(e) . Daher gehen wir davon aus, dass, wenn die CMIP6-Modellierungsgruppen die Empfehlungen von Matthes et al. übernommen haben. ( 2017 ) , dann wird der IPCC AR6 wahrscheinlich zu einem ähnlichen Ergebnis kommen wie der AR5. Das Gleiche würde passieren, wenn sie entweder die Methode von Coddington et al. ( 2016 ) oder die „LASP“-Schätzungen von Svalgaard ( 2014 ) – Abbildung 15(f) bzw. (g) .

Aus Abbildung 16 können wir jedoch ersehen, dass die Verwendung vieler TSI-Schätzungen zur „hohen Sonnenvariabilität“ eine viel größere Rolle der Sonne implizieren könnte, als der AR5 des IPCC vorzeitig festgestellt hatte. Insbesondere stellen wir fest, dass entweder Scafetta & Willson ( 2014 ); Scafetta et al. ( 2019 ); Hoyt & Schatten ( 1993 ) oder Bard et al. ( 2000 ); Ammann et al. ( 2007 ) würde das Gegenteil des IPCC AR5 implizieren, d. h. dass die solare Variabilität die Hauptursache für die langfristige Erwärmung war – siehe Abbildung 16(a) und (b) . Zum Beispiel Hoyt & Schatten ( 1993).Die Schätzung legt nahe, dass 98 % des langfristigen Trends (1841–2018) der rein ländlichen Temperaturschätzungen durch die solare Variabilität erklärt werden können – siehe Abbildung 16(a) . Dies entspricht dem, was Soon et al. ( 2015 ) gefunden (Soon et al. 2015 ) . Inzwischen haben Bard et al. ( 2000 ); Ammann et al. Die Schätzung von ( 2007 ) legt nahe, dass der gesamte Erwärmungstrend (obwohl diese Schätzung 1998 endet), der für die rein ländlichen und

ozeanischen Temperaturreihen beobachtet wurde, durch solare Variabilität erklärt werden kann und die Residuen eher auf eine leichte Abkühlung durch anthropogene Antriebe schließen lassen – siehe Abbildung 16(b) .

Es sollte bereits klar sein, dass die Antwort auf unsere Frage „Wie stark hat die Sonne die Temperaturtrends auf der Nordhalbkugel beeinflusst?“ lautet. hängt im Wesentlichen davon ab, welche TSI-Schätzung wir wählen. Den Lesern, die dies beunruhigend finden, möchten wir betonen, dass wir Ihr Unbehagen teilen, und wir sind überrascht, dass weder der IPCC AR5 (IPCC 2013a) noch Matthes et al. ( 2017 ) scheint darüber besorgt gewesen zu sein.

Es gibt noch ein weiteres Anliegen, das ebenfalls Beachtung verdient. Aus Abbildung 15(c) können wir ersehen, dass Steinhilber et al. ( 2009 ) Schätzung (Steinhilber et al. 2009) impliziert, dass ein erheblicher Prozentsatz der langfristigen Erwärmung durch solare Variabilität erklärt werden kann, z. B. bis zu 64 % des Trends der städtischen und ländlichen Temperaturschätzung von 1815 bis 2008 und 73 % der Meerestemperatur von 1850 bis 2008 Die Schätzung könnte mit der solaren Variabilität erklärt werden. Dies scheint im Widerspruch zur Schlussfolgerung des IPCC AR5 zu stehen, obwohl dies eine der vier TSI-Schätzungen war, die von den CMIP5-Klimamodellierungsgruppen berücksichtigt wurden. Eine teilweise Erklärung ist, dass sich die meisten CMIP5-Modellierungsgruppen auf eine der anderen drei zuvor erwähnten Schätzungen stützten. Wir vermuten jedoch, dass ein größerer Faktor die Tatsache ist, dass die langfristige Variabilität des Steinhilber et al. ( 2009 ) Die Schätzung wurde im Vergleich zu der Variabilität, die den zugrunde liegenden Solar-Proxy-Daten, die zur Erstellung der Schätzungen verwendet wurden, innewohnt, erheblich gedämpft.

Die Studie von Steinhilber et al. ( 2009 ) Schätzung basiert überwiegend auf kosmogenen Nukleotid-Solar-Proxys (Steinhilber et al. 2009 ), ähnlich der Schätzung von Bard et al. ( 2000 ) Schätzung (Bard et al. 2000 ). Um diese Proxy-Reihe in absolute TSI-Werte umzuwandeln, haben Steinhilber et al. ( 2009 ) wandten eine lineare Beziehung auf die Proxywerte an (siehe Gleichung 4) (Steinhilber et al. 2009 ). Steinhilber et al. ( 2009 ) argumentierten, dass ihre Skalierung angemessen sei, da sie im Vergleich zu der durch den PMOD-Satellitenverbund implizierten Variabilität günstig sei. Wie wir jedoch in Abschnitt 2.2 besprochen haben gibt es eine anhaltende Debatte darüber, welche der konkurrierenden Satellitenkomposite am zuverlässigsten sind. Auch Soon ( 2014 ) kritisierte die Skalierung von Steinhilber et al. ( 2009 ) indem er feststellte, dass es effektiv auf nur vier Datenpunkten basierte und dass zwei dieser Datenpunkte problematisch waren (Soon 2014 ).

Auf jeden Fall ist aus Abbildung 2(c) ersichtlich, dass die absolute Variabilität in  $W m^{-2}$  des Steinhilber et al. ( 2009 ) ist im Vergleich zu den Schätzungen der „hohen Sonnenvariabilität“ in Abbildung 3 sehr niedrig , obwohl die relative Variabilität der zugrunde liegenden Daten recht

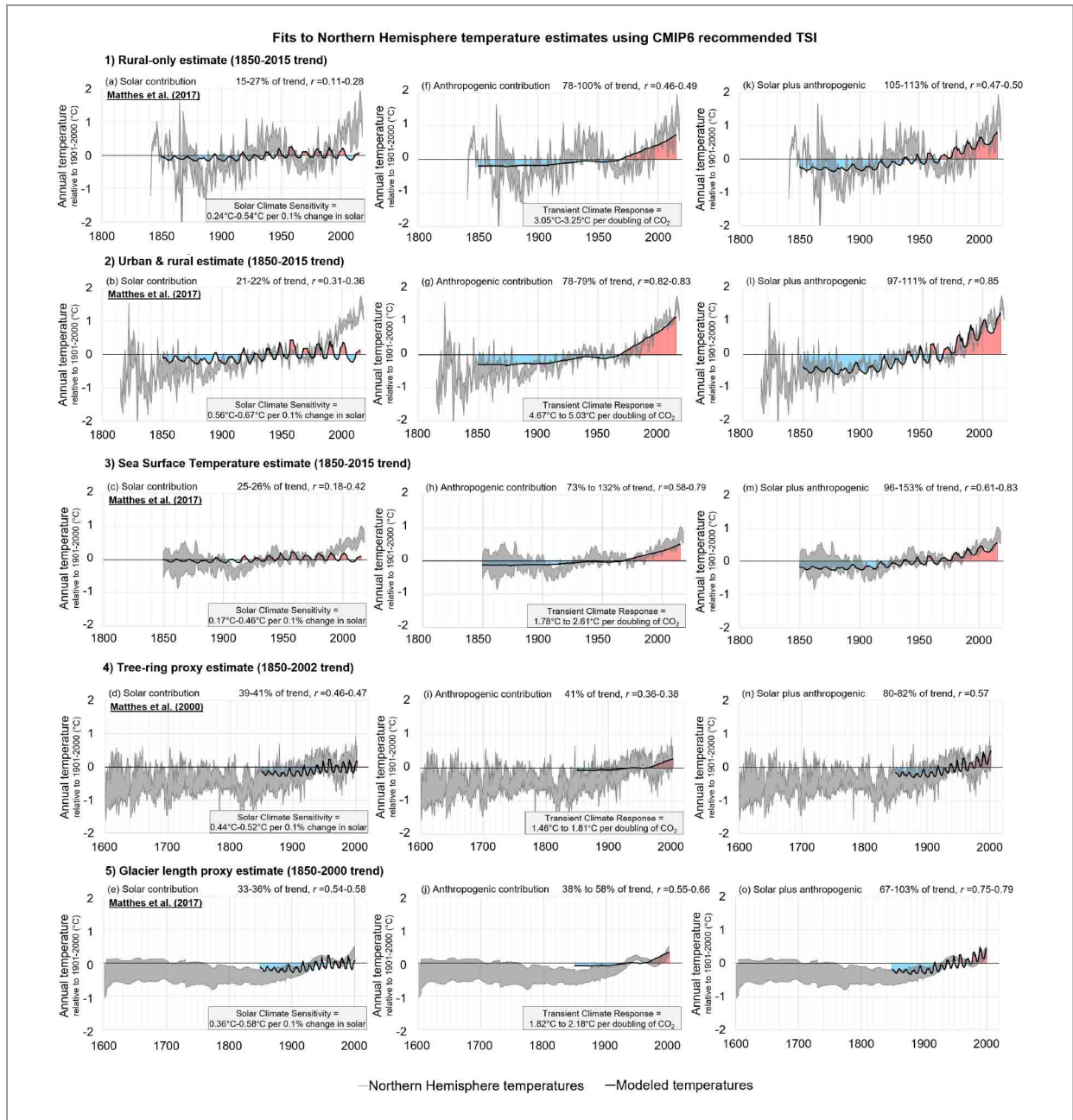


erheblich ist. Da die aktuellen globalen Klimamodelle im Wesentlichen den potenziellen Einfluss der solaren Variabilität auf das Klima durch Änderungen des absoluten TSI (in  $\text{W m}^{-2}$ ) modellieren, ist es unwahrscheinlich, dass sie eine so große solare Rolle erkennen, wie in Abbildung 15(c) angedeutet unter Verwendung der von Steinhilber et al. angewendeten Skalierung. ( 2009 ).

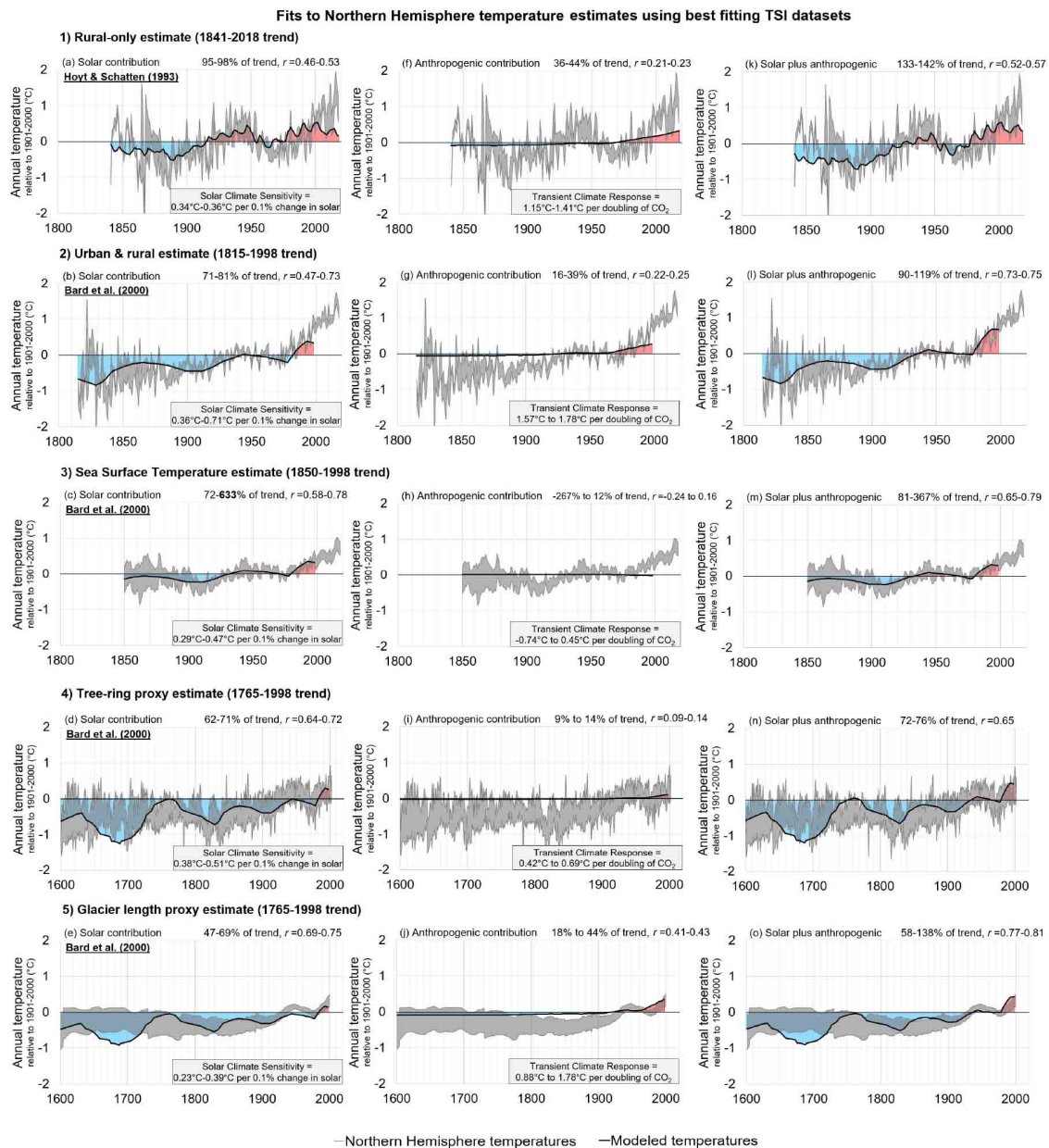
Ein weiterer bemerkenswerter Punkt bei den Ergebnissen in den Abbildungen 15 und 16 ist, dass keine der Anpassungen in der Lage war, die langfristigen Erwärmungstrends der beiden auf Proxys basierenden Schätzungen allein im Hinblick auf solare und anthropogene Faktoren zu 100 % zu erklären. Wenn die Proxy-basierten Schätzungen zuverlässig sind, deutet dies darauf hin, dass es wichtige zusätzliche Klimatreiber gibt, die in den aktuellen globalen Klimamodellen nicht berücksichtigt werden. Dies könnte auch darauf hindeuten, dass die aktuellen Modelle das Ausmaß der internen Klimavariabilität unterschätzen (Wyatt & Curry 2014 ; Kravtsov et al. 2014 ).

Eine Einschränkung der obigen Analyse besteht darin, dass sie nur die linearen Trends vergleicht und gegenüberstellt und, wie erwähnt, die wahren multidekadischen Trends sowohl der beobachteten Daten als auch der modellierten Anpassungen nur grob durch lineare Trends angenähert werden. Außerdem passte die obige Analyse nur die solaren und anthropogenen Komponenten an die Mittelwerte der fünf Temperaturschätzungen für die nördliche Hemisphäre an. Wie in Abschnitt 3 besprochen , sind mit jeder Temperaturschätzung der nördlichen Hemisphäre erhebliche Unsicherheiten verbunden. Aus diesem Grund haben wir für jede Schätzung Ober- und Untergrenzen angegeben – siehe Abbildung 13 .

Daher präsentieren wir in den Abbildungen 17 und 18 eine detailliertere Analyse für 10 unserer 80 Kombinationen. In dieser Analyse zeichnen wir die jährlichen Zeitreihen für jede der Anpassungen auf und vergleichen sie mit den Temperaturschätzungen, an die sie angepasst wurden. Dies ermöglicht es uns, die relativen Größen und Zeitpunkte der multidekadischen Schwankungen im TSI und in den Temperaturschätzungen der nördlichen Hemisphäre zu vergleichen und gegenüberzustellen und nicht nur die langfristigen linearen Trends.



**Abb. 17** Die Ergebnisse der Anpassungen an die fünf verschiedenen Temperaturdatensätze der nördlichen Hemisphäre unter Verwendung von Matthes et al. (2017) TSI-Schätzung, die den CMIP6-Modellierungsgruppen zur Verwendung in ihren Simulationen für den bevorstehenden AR6 des IPCC (derzeit fällig 2021–22) empfohlen wurde. (a)-(e) liefern die Ergebnisse für den maximalen Solarbeitrag, der durch die lineare Anpassung der kleinsten Quadrate impliziert wird. (f)-(j) liefern die Ergebnisse für die besten Anpassungen des Datensatzes „anthropogene Antriebe“ an die statistischen Residuen, die nach der solaren Anpassung verbleiben. (k)-(o) liefern die Ergebnisse der kombinierten „solaren plus anthropogenen“ Anpassungen. Zum leichteren Vergleich sind die y-Achsen in Abb. 7–13, 17 und 18 werden alle im gleichen Maßstab dargestellt, ebenso wie die x-Achsen, mit Ausnahme einiger der erweiterten Diagramme, die Paläoklimaschätzungen verwenden.



**Abb. 18** Die Ergebnisse der Anpassungen an die fünf verschiedenen Temperaturdatensätze der nördlichen Hemisphäre unter Verwendung der TSI-Schätzungen, die die größte Rolle für die solare Variabilität der 16 liefern. Für die rein ländlichen Temperaturreihen entspricht dies dem Scafetta & Willson (2014) ; Scafetta et al. (2019) ; Hoyt & Schatten (1993) schätzen, während dies für die anderen vier Temperaturreihen der Schätzung von Bard et al. entspricht. (2000) ; Ammann et al. (2007) schätzen. (a)-(e) liefern die Ergebnisse für den maximalen Solarbeitrag, der durch die lineare Anpassung der kleinsten Quadrate impliziert wird. (f)-(j) liefern die Ergebnisse für die besten Anpassungen des Datensatzes „anthropogene Antriebe“ an die statistischen Residuen, die nach der solaren Anpassung verbleiben. (k)-(o) liefern die Ergebnisse der kombinierten „solaren plus anthropogenen“

Anpassungen. Zum leichteren Vergleich sind die y-Achsen in Abb. 7 – 13 , 17 und 18 sind alle im gleichen Maßstab dargestellt, ebenso wie die x-Achsen, mit Ausnahme einiger der erweiterten Diagramme, die Paläoklimaschätzungen verwenden.

In Abbildung 17 präsentieren wir die Ergebnisse für die fünf Anpassungen an Matthes et al. ( 2017 ) TSI-Datensatz, da dies der Datensatz ist, den die CMIP6-Modellierungsgruppen für ihre Simulationen verwenden sollen, die in den kommenden AR6 des IPCC integriert werden sollen, der derzeit zwischen 2021 und 2022 veröffentlicht werden soll. Wir haben auch qualitativ erhalten ähnliche Ergebnisse wie Matthes et al. ( 2017 ) für sechs der verbleibenden fünfzehn TSI-Datensätze:

- Wang et al. ( 2005 )
- Krivova et al. ( 2007 ); Krivova et al. ( 2010 )
- Vieira et al. ( 2011 )
- Coddington et al. ( 2016 )
- Svalgaard ( 2014 ) „LASP“
- Egorova et al. ( 2018 ) „PHI-US16“ (Egorova et al. 2018 )

Wie oben beschrieben, sind die ersten drei dieser TSI-Datensätze – zusammen mit dem Steinhilber et al. ( 2009 )-Datensatz – waren die einzigen, die von den CMIP5-Modellierungsgruppen berücksichtigt wurden, d. h. die Ergebnisse des Klimamodells, auf die sich der IPCC AR5 überwiegend stützte. Daher sind die Ergebnisse in Abbildung 17 auch weitgehend auf den AR5 des IPCC anwendbar (IPCC 2013a ).

In der Zwischenzeit präsentieren wir in Abbildung 18 die Ergebnisse der TSI-Datensätze, die für jede unserer fünf Temperaturschätzungen für die nördliche Hemisphäre die beste statistische Anpassung an die Sonnenvariabilität liefern. Für die nur ländliche Temperaturreihe, Abbildung 18(a) , entspricht dies der Schätzung von Hoyt & Schatten ( 1993 ) (Scafetta & Willson 2014 ; Scafetta et al. 2019 ; Hoyt & Schatten 1993 ). Dies stellt daher eine Aktualisierung der endgültigen Analyse von Soon et al. dar. ( 2015), die zu dem entgegengesetzten Schluss kam wie der AR5 des IPCC. Für die

anderen vier Temperaturschätzungen der nördlichen Hemisphäre wurde jedoch eine etwas bessere statistische Übereinstimmung für einen anderen TSI-Datensatz gefunden, d. h. Bard et al. ( 2000 ); Ammann et al. ( 2007 ).

Unter der expliziten Annahme, dass die Beziehung zwischen TSI und den Oberflächentemperaturen der nördlichen Hemisphäre linear ist, liefern die Ergebnisse von Abbildung 18 daher eine Obergrenze für den solaren Beitrag – gemäß den derzeit verfügbaren Datensätzen. Abbildung 17 ist repräsentativ für die Position, die das IPCC für seinen AR5 (IPCC 2013a ) einnimmt, und spiegelt wahrscheinlich den Standpunkt seines AR6 wider, wenn sie den Ansatz von AR5 wiederholen, außer dass sie die TSI-Empfehlungen von Matthes et al. übernehmen. ( 2017 ). Wir betonen erneut, dass es zahlreiche Forschungsergebnisse gibt, die darauf hindeuten, dass die Beziehungen zwischen Sonne und Klima möglicherweise nichtlinear sind, wie in den Abschnitten 2.5 – 2.6 erläutert . Tatsächlich, Scafetta ( 2009 ) stellt fest, dass die Anerkennung einer nichtlinearen Beziehung möglicherweise das Ausmaß der solaren Komponente des jüngsten Klimawandels erhöhen kann (Scafetta 2009 ).

Leser fragen sich vielleicht, was die entsprechende „Untergrenze“ für die Rolle von TSI auf die Temperatur der nördlichen Hemisphäre ist. Aus Abbildung 15(h) können wir ersehen, dass die Untergrenze durch den „SSN“-Datensatz von Svalgaard ( 2014 ) beschrieben wird und einfach 0 % beträgt. Der Kürze halber haben wir für diese Zeitreihe nicht das Äquivalent zu den Abbildungen 17 oder 18 dargestellt, da es sich um ein eher triviales Ergebnis handelt – der „SSN“-Datensatz von Svalgaard ( 2014 ) impliziert im Wesentlichen, dass es keinen nachweisbaren Einfluss von TSI auf die Temperaturen der nördlichen Hemisphäre gegeben hat seit mindestens 1700 (dem Beginn der Zeitreihe). Wir laden interessierte Leser ein, die vollständigen Ergebnisse für alle 80 Kombinationen zu studieren, die wir numerisch als Microsoft Excel-Datendatei bereitstellen. Ergänzende Materialien

Anhand der Abbildungen 15 und 17 können wir nun erkennen, warum der IPCC AR5 seit Mitte des 20. Jahrhunderts keine Rolle für die solare Variabilität bei der beobachteten Erwärmung feststellen konnte. Wenn man eine der folgenden TSI-Schätzungen verwendet, ist es schwierig, eine große Rolle (wenn überhaupt) für die solare Variabilität bei den Temperaturtrends der nördlichen Hemisphäre zu finden: Wang et al. ( 2005 ); Krivova et al. ( 2007 ); Krivova et al. ( 2010 ); Vieira et al. ( 2011 ); Matthes et al. ( 2017 ); Coddington et al. ( 2016 ); Svalgaard ( 2014 ) „LASP“; oder die „PHI-US16“-Version von Egorova et al. ( 2018 ). Wie oben erwähnt, wenn Sie sich auf Svalgaard verlassen (2014 ) „SSN“-Schätzung – die im Wesentlichen nur eine neu skalierte Version der SSN-Zeitreihe ist – dann impliziert dies, dass die solare Variabilität seit mindestens dem 18. Jahrhundert fast keine Rolle mehr gespielt hat .

Andererseits können wir anhand der Abbildungen 16 und 18 auch erkennen, warum Soon et al. ( 2015 ) bestritten die Schlussfolgerung des IPCC AR5 und auch, warum Soon et al. ( 2015 ) bestritten die Schlussfolgerung des IPCC AR5 und auch, warum Scafetta et al. hatte die ähnliche Schlussfolgerung des früheren IPCC AR4 bestritten (Scafetta & West 2008a ; Scafetta 2009 ). Wenn Sie den Datensatz von Hoyt & Schatten ( 1993 ) berücksichtigen (Scafetta & Willson 2014 ; Scafetta et al. 2019 ; Hoyt & Schatten 1993 ) .), aktualisiert mit dem ACRIM-Datensatz, können Sie 95–98 % des langfristigen Erwärmungstrends (1841–2018) der rein ländlichen Schätzung der Temperaturtrends der nördlichen Hemisphäre allein anhand der solaren Variabilität erklären. Inzwischen haben Bard et al. ( 2000 ) Schätzung (Bard et al. 2000 ; Ammann et al. 2007 ) kann 100 % des beobachteten SST-Erwärmungstrends über den maximalen Überlappungszeitraum (d. h. 1850–1998) erklären. Es kann auch den Großteil des Erwärmungstrends für die städtische und ländliche Schätzung sowie die Baumring-Proxy-Reihe erklären. Zugegebenermaßen haben Bard et al. ( 2000 ) Schätzung kann nur 47–69 % des langfristigen Erwärmungstrends aus der Gletscherlängen-Proxy-Reihe erklären, aber das ist immer noch mehr als die 18–44 %, die im Hinblick auf den entsprechenden anthropogenen Antrieb erklärt werden können – siehe Abbildung 18(e), (j) und (o) .

Der Datensatz von Hoyt & Schatten ( 1993 ) und der Datensatz von Bard et al. ( 2000 )-Datensatz deuten darauf hin, dass der größte Teil (wenn nicht der gesamte) Erwärmungstrend der nördlichen Hemisphäre seit dem 19. Jahrhundert (und früher) auf solare Variabilität zurückzuführen ist.

Einige Leser könnten dem entgegen, dass Bard et al. ( 2000 ) Der Datensatz endet 1998 und die große Rolle der Solarenergie bis 1998 könnte in den letzten Jahren zurückgegangen sein. Wir sind uns einig, dass dies eine bedauerliche Einschränkung der verfügbaren Daten darstellt (obwohl die beiden Proxy-basierten Serien auch etwa zur gleichen Zeit enden). Dies ist besonders plausibel für die auf Stadt und Land basierende Schätzung, die einen viel stärkeren Erwärmungstrend im Vergleich zu den anderen vier Schätzungen impliziert (siehe Abb. 13 ), obwohl wir vermuten, dass die zusätzliche Erwärmung dieser auf Stadt und Land basierenden Schätzung möglicherweise bei liegt zumindest teilweise aufgrund des Urbanisierungsbias – siehe Abschnitte 3.1 – 3.2 . Anstatt jedoch die Eignung für diesen Datensatz bis zum Ende des 20. Jahrhunderts zu ~~verwerfen~~ Jahrhundert als veraltet gilt, deutet dies für uns darauf hin, dass es an der Zeit ist, das Buch von Bard et al. zu aktualisieren. ( 2000 ) Datensatz. Möglicherweise könnte dies durch Kalibrierung und Erweiterung der Zeitreihe mit einem der konkurrierenden Satellitenkomposite erreicht werden, wir fordern Forscher, die diesen Ansatz in Betracht ziehen, jedoch dringend auf, die laufenden Debatten zwischen den konkurrierenden Satellitengruppen anzuerkennen (siehe Abschnitt 2.2), und wir würden empfehlen, zu vergleichen und im Gegensatz dazu zumindest die ACRIM- und PMOD-TSI-Satellitenverbunde (Scafetta et al. 2019 ; Fröhlich & Lean 2002 ). Wir würden auch empfehlen, die

Auswirkungen der Variation der verwendeten Solar-Proxies zu berücksichtigen und die Debatte darüber zu führen, ob die Schätzungen mit hoher oder niedriger Variabilität zuverlässiger sind (siehe Abschnitt 2.3 ).

Bei den verbleibenden TSI-Schätzungen handelt es sich bei fünf um Schätzungen mit hoher Variabilität: Shapiro et al. ( 2011 ); Schmidt et al. ( 2012 ); Lean et al. ( 1995 ); und die Versionen „PHI-MU16“, „PHI-MC17“ und „SSR11“ von Egorova et al. ( 2018 ). Die einzige andere Schätzung, Steinhilber et al. ( 2009 ) ist eine der Schätzungen mit geringer Variabilität – siehe Abbildung 2 . Im Großen und Ganzen implizieren diese Schätzungen eine Rolle der solaren Variabilität für Temperaturtrends auf der Nordhalbkugel, die zwischen der „größtenteils vom Menschen verursachten“ Schlussfolgerung des IPCC AR5 (IPCC 2013a ) und der „größtenteils natürlichen“ Schlussfolgerung von Soon et al. liegt. ( 2015 ).

## 6. Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Durch die Durchsicht der Literatur und der verfügbaren Daten haben wir 16 verschiedene Schätzungen darüber identifiziert, wie sich der TSI seit dem 19. Jahrhundert (und früher) verändert hat – siehe Tabelle 1 und Abbildungen 2 und 3 . Obwohl einige dieser Schätzungen einander sehr ähnlich sind, deuten andere auf ganz unterschiedliche Trends hin und können daher zu unterschiedlichen Schlussfolgerungen führen. Der IPCC AR5 scheint versucht zu haben, dieses Problem zu lösen, indem er diejenigen Datensätze ignorierte, die widersprüchliche Ergebnisse lieferten. Besorgniserregend ist, dass die Lektüre von Matthes et al. ( 2017 ) scheint es, dass die CMIP6-Modellierungsgruppen aktiv dazu ermutigt wurden, nur eine Schätzung des TSI für den Zeitraum von 1850 bis heute zu berücksichtigen, nämlich die von Matthes et al. ( 2017 ) Datensatz (Matthes et al.2017 ). Im Hinblick auf die wissenschaftliche Objektivität scheint uns dies ein Ansatz gewesen zu sein, der mit den bereits in der wissenschaftlichen Literatur veröffentlichten Ergebnissen nicht vereinbar und im Vergleich zu den in diesem Artikel und anderen kürzlich veröffentlichten Arbeiten hervorgehobenen Ergebnissen sogar unklug ist.

**Empfehlung 1.** Wir fordern Forscher, die wirklich daran interessiert sind, die im Titel dieses Papiers gestellte Frage zu beantworten, auf eine breite Palette von TSI-Schätzungen zu berücksichtigen und nicht nur solche, die mit den früheren Überzeugungen oder Erwartungen der Forscher übereinstimmen. Die in den Abbildungen 2 und 3 beschriebenen 16 TSI-Schätzungen sowie die vier zusätzlichen Schätzungen in Abbildung 1 sind alle in den ergänzenden Materialien enthalten .

Selbst unter diesen 20 verschiedenen Schätzungen scheint es, dass viele der zugrunde liegenden Herausforderungen und Unsicherheiten, die mit der Schätzung der Schwankungen der Sonnenaktivität in den letzten Jahrzehnten, geschweige denn Jahrhunderten, verbunden sind, nicht

zufriedenstellend gelöst wurden.

**Empfehlung 2.** Wir fordern die Forscher auf, der wissenschaftlichen Debatte zwischen den konkurrierenden TSI-Satellitenverbunden (siehe Abschnitt 2.2 ) mehr Aufmerksamkeit zu schenken und die konkurrierenden Datensätze bei der Bewertung der Solartrends während des Satellitenzeitalters zu berücksichtigen. Insbesondere scheinen viele Forscher die anhaltende wissenschaftliche Debatte zwischen den Gruppen ACRIM und PMOD über die Trends im Satellitenzeitalter übersehen zu haben. Für aktuelle Rückblicke auf die aktuelle Debatte aus verschiedenen Perspektiven empfehlen wir die Lektüre/Wiederholung von Zacharias ( 2014 ); Dudok de Wit et al. ( 2017 ); und Scafetta et al. ( 2019 ) zum Beispiel.

Für die Zeit vor den Satelliten scheinen sich viele Forscher zu sehr auf die Verwendung vereinfachter TSI-Proxy-Modelle verlassen zu haben, die auf einer einfachen linearen Regressionsanalyse zwischen Sonnenflecken und Faculae-Aufzeichnungen oder anderen Proxys basieren, um die Sonnenaktivität während der Zeit vor den Satelliten zu beschreiben. Aus mehreren Beobachtungen geht hervor, dass die Variabilität der Sonnenleuchtkraft ein viel komplexeres Phänomen ist. Als Ausgangspunkt empfehlen wir den Lesern, z. B. Hoyt & Schatten ( 1993 ); Livingston ( 1994 ); Bald et al. ( 2015 ).

Ein weiteres anhaltendes Problem besteht darin, die wahren Temperaturtrends auf der Nordhalbkugel festzustellen. In Abschnitt 3 haben wir mehrere verschiedene Methoden zur Berechnung und Schätzung von Temperaturtrends seit dem 19. Jahrhundert (oder früher) identifiziert – siehe Tabelle 2 . Die meisten dieser Schätzungen weisen mehrere gemeinsame Merkmale auf, z. B. eine Erwärmung von 1900 bis 1940; eine Abkühlung oder ein Plateau in den 1950er bis 1970er Jahren; eine Erwärmung von den 1980er bis 2000er Jahren. Allerdings gibt es, wie in Abschnitt 3.6 erläutert , wichtige Unterschiede zwischen den Schätzungen zum genauen Zeitpunkt und relativen Ausmaß der einzelnen Erwärmungs- und Abkühlungsperioden.

Bemerkenswerterweise erscheint die jüngste Erwärmungsperiode nur in den Schätzungen, die sowohl städtische als auch ländliche Stationsaufzeichnungen berücksichtigen, besonders ungewöhnlich. Dies deutet für uns darauf hin, dass der Urbanisierungsbias weiterhin ein erhebliches Problem für aktuelle Schätzungen des Temperaturtrends darstellt (McKittrick & Nierenberg 2010 ; Soon et al. 2015 ; Soon et al. 2018 , 2019b ; Scafetta & Ouyang 2019 ; Scafetta 2021 ; Zhang et al. 2021 ). Wir erkennen jedoch an, dass dies im Widerspruch zu einigen Forschern steht, die behaupten, dass der Urbanisierungsbias nur ein kleines Problem für globale und hemisphärische Temperaturtrends darstellt, z. B. Jones et al. ( 1990 ), Parker ( 2006), Wickham et al. ( 2013 ) sowie mit einer separaten Gruppe von Forschern, die argumentieren, dass nach der Anwendung statistischer Homogenisierungstechniken (normalerweise automatisiert) auf die Daten die meisten



nichtklimatischen Verzerrungen (einschließlich Urbanisierungsverzerrungen) entfernt oder erheblich reduziert werden, z. B. Peterson et al. (1999), Menne & Williams (2009), Hausfather et al. (2013), Li & Yang (2019), Li et al. (2020b).

**Empfehlung 3.** Wir fordern die Forscher daher dringend auf, die Unterschiede zwischen den verschiedenen Schätzungen der Temperaturtrends auf der Nordhalbkugel genauer zu untersuchen. Insbesondere weisen wir darauf hin, dass trotz vieler gegenteiliger Behauptungen in der Literatur, z. B. Refs. (Jones et al. 1990; Parker 2006; Wickham et al. 2013; Peterson et al. 1999; Menne & Williams 2009; Hausfather et al. 2013; Li & Yang 2019; Li et al. 2020b) scheint das Urbanisierungsbias-Problem noch nicht zufriedenstellend gelöst zu sein. Obwohl sich unsere Analyse explizit auf die Nordhalbkugel beschränkte, da für die Südhalbkugel deutlich weniger Daten verfügbar sind, ist diese Empfehlung auch für diejenigen relevant, die sich mit globalen Temperaturtrends befassen.

**Empfehlung 4.** In dieser Übersicht haben wir uns hauptsächlich auf die einfache Hypothese konzentriert, dass es einen direkten linearen Zusammenhang zwischen TSI und den Oberflächentemperaturen der nördlichen Hemisphäre gibt. In den Abschnitten 2.5 und 2.6 haben wir jedoch gezeigt, dass es erhebliche Hinweise darauf gibt, dass die Beziehungen zwischen Sonne und Klima differenzierter und komplexer sind. Daher empfehlen wir auch weitere Forschung zu den potenziellen Beziehungen zwischen Sonne und Klima, die in den Abschnitten 2.5 – 2.6 besprochen werden.

**Empfehlung 5.** In diesem Papier haben wir uns auf die Rolle der Sonne beim jüngsten Klimawandel konzentriert und diese mit der Rolle anthropogener Faktoren verglichen. Daher haben wir, abgesehen von nebenbei, die mögliche Rolle anderer nicht solarbetriebener natürlicher Faktoren wie interne Veränderungen in der ozeanischen und/oder atmosphärischen Zirkulation nicht explizit untersucht. Wie in den Abschnitten 2.5 – 2.6 besprochen, können solche Faktoren tatsächlich eine solare Komponente haben, z. B. Refs. (Singer & Avery 2008; Shaviv 2008; Le Mouél et al. 2019a; Mörner et al. 2020; Ruzmaikin & Feynman 2002; van Loon et al. 2012; Roy 2018; Pan et al. 2020; Christoforou & Hameed 1997; Dima & Lohmann 2009; Bald 2009; Labitzke & Kunze 2012; Meehl et al. 2009; Mazzarella & Scafetta 2018). Wir ermutigen jedoch zu weiteren Untersuchungen zur Rolle anderer möglicher natürlicher Faktoren, die nicht unbedingt eine solare Komponente beim jüngsten Klimawandel haben, z. B. Refs. (Wyatt & Curry 2014; Kravtsov et al. 2014; Lindzen & Choi 2011; Spencer & Braswell 2014; Mauritsen & Stevens 2015).

**Abschluss.** Im Titel dieses Artikels fragten wir: „Wie stark hat die Sonne die Temperaturtrends auf der Nordhalbkugel beeinflusst?“ Nun dürfte jedoch klar sein, dass diese Frage trotz der Zuversicht, mit der viele Studien angeblich eine Antwort gegeben haben, noch nicht zufriedenstellend

beantwortet wurde. Angesichts der vielen gültigen abweichenden wissenschaftlichen Meinungen, die es zu diesen Themen noch gibt, argumentieren wir, dass die jüngsten Versuche, einen scheinbaren wissenschaftlichen Konsens (einschließlich der IPCC-Berichte) zu diesen wissenschaftlichen Debatten zu erzwingen, verfrüht und letztlich nicht hilfreich für den wissenschaftlichen Fortschritt sind. Wir hoffen, dass die Analyse in diesem Papier weitere Analysen und Diskussionen anregen und anregen wird. Mittlerweile ist die Debatte im Gange.

## Danksagungen

Die Hauptanalyse und der erste Entwurf des Manuskripts wurden von den ersten drei Autoren (RC, WS und MC) durchgeführt. Alle weiteren Co-Autoren sind in alphabetischer Reihenfolge aufgeführt. Wie in der Einleitung erläutert, besteht der Ansatz, den wir in dieser Rezension gewählt haben, darin, die vielen abweichenden wissenschaftlichen Perspektiven zu vielen der untersuchten Themen ausdrücklich anzuerkennen. Daher konnten die Co-Autoren nicht in allen Fragen einen gemeinsamen Konsens erzielen. Vielmehr haben wir uns bemüht, alle konkurrierenden wissenschaftlichen Perspektiven so fair und aufgeschlossen wie möglich darzustellen. Vor diesem Hintergrund haben alle Co-Autoren dem Text zugestimmt, auch wenn die meisten von uns zu vielen der beschriebenen Debatten eine bestimmte Meinung haben und diese Meinungen zwischen den Co-Autoren unterschiedlich sind.

NS stellte auch die aktualisierten Zeitreihen von Hoyt und Schatten ( 1993 ) in Abbildung 3(a) zur Verfügung , und VMVH führte die Interpolationen der fehlenden Tageswerte durch, die für die Erstellung von Abbildung 5 verwendet wurden . Wir danken den Anbietern der in diesem Dokument verwendeten Datensätze dafür, dass sie den Zugriff auf ihre Zeitreihen entweder durch öffentliche Archivierung oder durch persönliche Kommunikation ermöglicht haben. Wir danken Dr. Tatiana Egorova für die Bereitstellung der vier Egorova et al. ( 2018 ) Zeitreihe (Abb. 3(e)-(h)). Wir danken außerdem Prof. Vincent Courtillot, Dr. Ricky Egeland, Prof. Demetris Koutsoyiannis, Dr. Frank Stefani, Prof. Henrik Svensmark und Prof. HongRui Wang für nützliche Kommentare und Feedback zu frühen Entwürfen. RC und WS erhielten bei der Durchführung der Forschung für dieses Papier finanzielle Unterstützung vom Zentrum für Umweltforschung und Geowissenschaften (CERES). Das Ziel von CERES ist die Förderung einer aufgeschlossenen und unabhängigen wissenschaftlichen Forschung. Aus diesem Grund sind Spender von CERES streng verpflichtet, keinen Einfluss auf die Forschungsrichtung oder die Ergebnisse von CERES zu nehmen. Leser, die CERES unterstützen möchten, finden Details unter <https://ceres-science.com/> . GWH dankt der NASA, der NSF, der Tennessee State University und dem Bundesstaat Tennessee für die langfristige Unterstützung im Rahmen seines Centers of Excellence-Programms.

Die ergänzenden Materialien zu diesem Dokument können unter <http://www.raa-journal.org/docs/Supp/ms4906Supplementary Materials.xlsx> heruntergeladen werden .

## Fußnoten

- 1 Dies lässt sich an einigen Reaktionen erkennen, die bei der Veröffentlichung von Artikeln zu diesem Konzept aufgetreten sind. Wir geben zwei Beispiele, um die Streitigkeit dieser Theorie zu veranschaulichen und wie häufig nichtwissenschaftliche Argumente in einer Diskussion dieser Theorie angeführt werden. Wir geben die folgenden Beispiele nicht, weil wir glauben, dass die Theorie jenseits wissenschaftlicher Kritik liegt (weit davon entfernt), sondern vielmehr, um zu betonen, dass Leser, die an der wissenschaftlichen Gültigkeit der Theorie (oder sonstwie) interessiert sind, einen Großteil der Kritik an der Theorie erkennen sollten Artikel, die SPI fördern, gehen oft über den Bereich der rein wissenschaftlichen Debatte hinaus. Als erstes Beispiel wurde 2014 in der neuen Zeitschrift „Pattern Recognition in Physics“ eine Sonderausgabe veröffentlicht, die sich den Untersuchungen zur SPI-Theorie widmete. In Beantwortung, Der Geschäftsführer von Copernicus Publications kündigte die gesamte Zeitschrift aus noch nicht ganz geklärten Gründen, fügte aber offenbar hinzu, dass einer der Herausgeber der Zeitschrift ein „Klimaskeptiker“ sei und dass der Schlussartikel in der Sonderausgabe einige davon kritisierte die Interpretationen und Schlussfolgerungen des „IPCC-Projekts“ zu zukünftigen Trends des Klimawandels. Die vollständige Stellungnahme des Geschäftsführers zu seiner Entscheidung sowie Links zu einem Archiv der Zeitschrift finden interessierte Leser unter <https://www.pattern-recognition-in-physics.net/> . Einer der betreffenden Herausgeber, der verstorbene Nils-Axel Mörner, antwortete ebenfalls in Mörner ( 2015 ). Zur Klarstellung: Wir argumentieren hier nicht, dass die Artikel in dieser Sonderausgabe irgendwie vor wissenschaftlicher Kritik oder Prüfung hätten geschützt werden sollen. Im Gegenteil stellen wir fest, dass die Entscheidung des Geschäftsführers, die Zeitschrift zu schließen, offenbar nicht auf den in den Artikeln dargelegten wissenschaftlichen Beweisen und Argumenten für SPI beruhte. Darüber hinaus ist es jetzt, da die Zeitschrift eingestellt wurde, wahrscheinlich, dass viele von denen, die sonst vielleicht für oder gegen die in einem dieser Artikel dargelegten wissenschaftlichen Argumente debattiert hätten, die Artikel einfach ablehnen werden. Als weiteres Beispiel haben Zharkova et al. ( 2019) wurde zurückgezogen (trotz der Einwände von drei der vier Autoren (Zharkova et al. 2020 )), da den Autoren in einem der Unterabschnitte des Papiers offenbar ein Fehler bei der Interpretation der SPI-Theorie unterlaufen ist. Insbesondere scheinen sie in ihrem vorletzten Unterabschnitt fälschlicherweise die Tatsache übersehen zu haben, dass sich die Erde bei der Bewegung des Schwerpunkts des Sonnensystems größtenteils im Tandem mit der Sonne bewegt, d. h. der

Abstand Erde-Sonne schwankt nicht so stark wie sie es getan haben vermutet. Dies war in der Tat ein Fehler, wie beispielsweise Scafetta (2020) feststellte. Außerdem baute ein Großteil des restlichen Artikels auf früheren Analysen auf, die gesondert kritisiert wurden, z. B. Usoskin (2012) (obwohl sie von den Autoren verteidigt wurden (Zharkova et al. 2018)). Angesichts der Tatsache, dass sich der fragliche Fehler jedoch eigentlich nur auf einen Unterabschnitt der Arbeit und einen Satz in ihren Schlussfolgerungen bezog, ist es überraschend, dass die Reaktion der Zeitschrift bestand, den Artikel zurückzuziehen, anstatt die Autoren zu ermutigen, eine Berichtigung herauszugeben.

---

## Sie können auch mögen

---

### ZEITUNGSARTIKEL

---

Kleinwasserkraftwerke in Pommern: Das Beispiel der Entwicklung moderner industrieller Backsteinarchitektur

---

CAD-CAE-Methoden zur Unterstützung der Restaurierung und Museumsausstellung von Bronzestatuen: der „Principe Ellenistico“

---

Herausforderungen bei der Erkennung und Zuordnung von Oberflächentemperaturtrends der nördlichen Hemisphäre seit 1850

---

Landbedeckungsmuster in der russischen Territorial- und Kommunalheraldik zwischen dem 17. und 19. Jahrhundert

---

Rotundenkirche in Russland als typologisches Phänomen

---

Wissenschaftliche Erforschung des Archipels Nowaja Semlja am Ende des 19. und Anfang des 20. Jahrhunderts



































































































































































































































