

Beilage zur Berliner Wetterkarte

Herausgegeben vom Verein BERLINER WETTERKARTE e.V.

zur Förderung der meteorologischen Wissenschaft

c/o Institut für Meteorologie der Freien Universität Berlin, Carl-Heinrich-Becker-Weg 6-10, 12165 Berlin

80/21

<http://www.berliner-wetterkarte.de>

ISSN 0177-3984

BM 01/21

10.11.2021

Attribution eines Kälteereignisses im Berliner Raum

Jonas Schröter (Institut für Meteorologie, FU Berlin)

unter Mitwirkung des Betreuers Philip Lorenz und Jordis Tradowsky

(Regionales Klimabüro Potsdam, Deutscher Wetterdienst)

Motivation

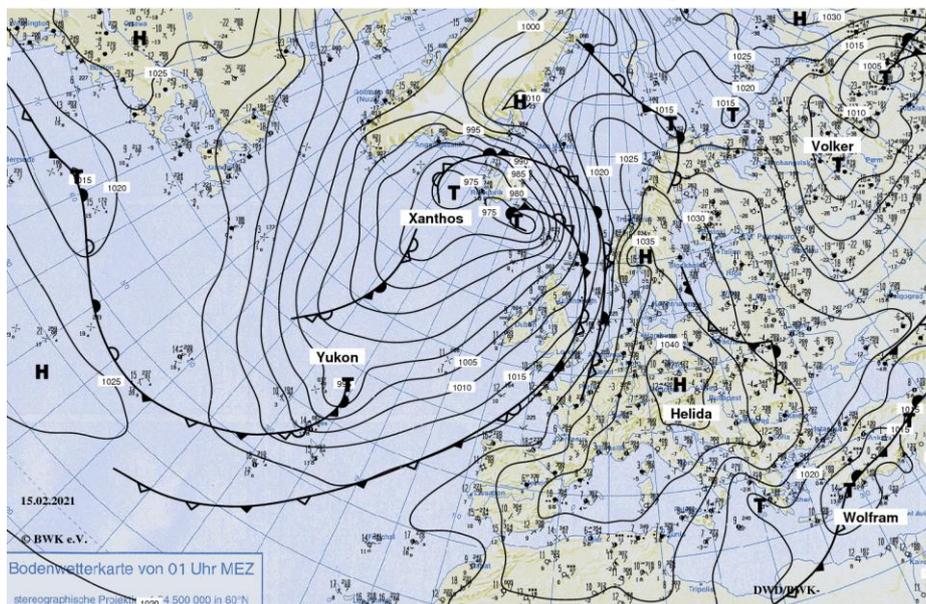
In den letzten Jahren ist die Diskussion um den anthropogenen Klimawandel immer präsenter geworden. Meist werden aktuelle Extremereignisse medial hervorgehoben und die Auswirkungen des Klimawandels auf das gegebene Ereignis diskutiert. Die sogenannte „Extremwetterattribution“ ermöglicht hierbei die Einordnung dieses Ereignisses.

In den Attributionsstudien werden bestimmte Ereignisse analysiert, um den Einfluss des Klimawandels auf dieses Ereignis zu bestimmen. Im Idealfall ergibt sich am Ende eine Aussage darüber, wie stark sich die Eintrittswahrscheinlichkeit des Extremereignisses verändert hat, zum Beispiel, dass es 2- bis 10-mal wahrscheinlicher geworden ist im Vergleich zu einer Welt ohne Klimawandel.

Im Gegensatz zu den meist untersuchten Hitze- und Dürreereignissen wird hier der Kälteeinbruch im Februar 2021 im Berliner Raum betrachtet. In diesem Winter traten nach einigen warmen Wintern wieder sehr niedrige Temperaturen und Schneefall in Berlin auf. In Berlin-Tegel wurde beispielsweise eine Minimumtemperatur von $-16,7^{\circ}\text{C}$ gemessen, in Berlin-Dahlem $-12,2^{\circ}\text{C}$. Noch kälter wurde es vor allem in Thüringen, wo verbreitet -20°C unterschritten worden sind, zum Beispiel in Mühlhausen/Thüringen-Görmär mit $-26,7^{\circ}\text{C}$ oder auch $-20,8^{\circ}\text{C}$ in Gera-Leumnitz.

Synoptischer Überblick

Zum Zeitpunkt des Kälteeinbruchs sorgten die Hochdruckgebiete GISELA und HELIDA für eine Blockierungswetterlage in Europa. Sie lagen über Skandinavien, sodass die vom Nordatlantischen Ozean ankommenden Tiefdruckgebiete nach Süden ausweichen mussten und über den Alpenraum zogen. Dadurch stellte sich eine östliche Strömung ein, die Arktikluft nach Mitteleuropa brachte.



Durch die starke Abkühlung in Mitteleuropa wanderte das Hoch HELIDA allerdings weiter nach Süden, sodass sich die Blockierung abschwächte und schließlich wenige Tage später von Tief XANTHOS durchbrochen wurde.

Abbildung 1:
Bodenwetterkarte,
15.02.2021, 01 Uhr MEZ,
letzter Tag der Kältewelle,
Berliner Wetterkarte

Stand der Forschung

Die Extremwetterattribution ist noch ein sehr junges Forschungsgebiet und wird erst seit Anfang der 2000er Jahre durchgeführt. Die erste Attributionsstudie wurde von STOTT, STONE und ALLAN (2004) durchgeführt und befasste sich mit dem Einfluss des Menschen auf die Hitzewelle im Jahr 2003. Seitdem gab es nach und nach immer mehr Studien zu weiteren Ereignissen, vor allem Dürren und Hitzewellen.

Seit 2012 gibt das Bulletin of the American Meteorological Society jährliche Sonderausgaben mit einigen Attributionsstudien heraus. 2014 wurde die World Weather Attribution gegründet, eine Organisation, die Wissenschaftler aus der ganzen Welt zusammen bringt, um an diesen Attributionsstudien zu arbeiten. Ziel der WWA ist es, so schnell wie möglich nach einem Extremereignis eine entsprechende Studie erstellen zu können, zum Beispiel für die Hitzewelle in Nordamerika im Sommer 2021, siehe PHILIP ET AL. (2021). Dabei haben sich in den letzten Jahren einige Methoden etabliert, und es wurden sogar Anleitungen, zum Beispiel OTTO (2017), veröffentlicht. Für die von der WWA durchgeführten Attributionen wurde vor allem die Methodik von OTTO (2017) und PHILIP ET AL. (2020) verwendet.

Im Rahmen dieser Studien wurden ebenfalls einige Tools entwickelt, die beim Durchführen einer Attribution hilfreich sind. Dazu zählt zum Beispiel der Climate Explorer des niederländischen Wetterdienstes KNMI (<https://climexp.knmi.nl>). Auch beim Deutschen Wetterdienst wird derzeit ein System, welches hauptsächlich auf Python beruht, entwickelt. Mit diesem System wurden auch die hier vorgestellten Ergebnisse der Attribution des Kälteereignisses erstellt, und die Software wurde im Laufe der Studie weiterentwickelt.

Daten

Für die Auswertungen wurden verschiedene Datensätze verwendet: zum einen die Beobachtungen der Wetterstation Berlin-Dahlem (vom 01.04.1908 bis 31.03.2021).

Um die Repräsentativität der Wetterstation für die analysierte Region zu überprüfen, wurde zusätzlich die über eine $2^{\circ} \times 2^{\circ}$ -Region um Berlin gemittelte Tagesmitteltemperatur des E-OBS v23.1 Datensatzes verwendet.

Weiterhin gehen die Daten von 8 globalen Klimamodellen der CMIP6-Generation in die Studie ein. Hier wurde die Tagesmitteltemperatur über die gleiche $2^{\circ} \times 2^{\circ}$ -Region um Berlin gewählt, da die Modelldaten nur sehr grob aufgelöst sind. Dabei existieren zwei verschiedene Varianten von Modellläufen: Die „historical“-Läufe, die die Welt mit dem menschlichen Einfluss darstellen, für den Zeitraum von 1850 bis 2015, ergänzt mit den zugehörigen ssp245-Szenarien für 2016 bis 2100, sowie die „hist-nat“-Läufe von 1850 bis 2020, bei denen die Treibhausgaskonzentrationen und die anthropogen verursachten Aerosole auf vorindustriellem Niveau fixiert sind und somit Klimaänderungen nur durch Vulkanaerosole und solare Einstrahlung beeinflusst werden. Es wurden für alle Modelle jeweils alle verfügbaren Realisierungen verwendet.

Methodik: Ereignisdefinition

Als Erstes muss eine Ereignisdefinition gewählt werden, wozu zum Beispiel die Variable gehört. Für die Auswertungen werden Tagesmitteltemperaturen verwendet, aus denen jedoch, um sich nicht auf einzelne kalte Nächte zu konzentrieren, ein gleitendes Mittel über drei Tage gebildet wird. Um schließlich auch nur Extremereignisse zu untersuchen, wird von diesem 3-Tages-Mittel noch das Jahresminimum gewählt. Dieses wird vom Juli des Vorjahres bis Juni entnommen, um die doppelte Aufführung eines extrem kalten Winters zum Jahreswechsel zu vermeiden. Die daraus folgende Variable wird dann als $TM3n$ (Minimum der über 3 Tage gemittelten Tagesmitteltemperatur) bezeichnet.

Da für die Klimamodelle und den E-OBS Datensatz ein Feldausschnitt gebraucht wird, wird für die Ereignisdefinition auch die Region „Berliner Raum“ genauer festgelegt. Die Grenzen dieser Region liegen bei $51,5^{\circ}$ und $53,5^{\circ}$ nördliche Breite und $12,5^{\circ}$ und $14,5^{\circ}$ östliche Länge. Zusätzlich muss auch noch ein Zeitraum gewählt werden, der möglichst dicht am Ereignis liegt. Die gesamte,

verfügbare Zeitreihe ist hierbei nicht sinnvoll, da der anthropogene Klimawandel einen Langzeittrend in den Temperaturen besitzt. Dementsprechend wird als Zeitraum für die Analyse die Zeit vom 1. Juli 1990 bis zum 30. Juni 2020 gewählt.

Methodik: GEV-Verteilungen und Auswertung der Klimamodelle

Für die Auswertung der Daten werden Generalisierte Extremwertverteilungen (GEV-Verteilungen) verwendet. Die GEV-Verteilung ist dabei wesentlich besser für Extremwerte geeignet als zum Beispiel die Normalverteilung. Die GEV-Verteilung besteht dabei aus drei Parametern: Dem Lokalisationsparameter μ , dem Skalenparameter σ und dem Formparameter ζ , der die Art der Verteilung bestimmt.

Um die Daten aus den Klimamodellen auszuwerten, müssen diese erst einmal vorbereitet werden. Hierfür werden die Region und der Zeitraum ausgeschnitten und die $TM3n$ berechnet. Da die einzelnen Modelle in den historical- und hist-nat-Simulationen mehrere Läufe besitzen, werden alle Läufe eines Modells in eine Datenreihe überführt. Bei 10 Läufen ergäbe sich dann in diesem Fall ein Datensatz mit 300 Temperaturwerten. Für die Auswertungen werden aus diesen Datensätzen anschließend die Wiederkehrzeiten T_i bestimmt, indem die Werte in dem Datensatz absteigend nach Größe sortiert werden. Aus der empirischen Wahrscheinlichkeit $P_i \{TM3n_i\} = 1 - (i - 1)/N$ eines einzelnen Wertes lässt sich dann die Wiederkehrzeit als Reziproke der Wahrscheinlichkeit bestimmen.

Für genauere Auswertungen werden schließlich für jeden Datensatz die Parameter der GEV-Verteilungen bestimmt. Dabei können die historical- und die hist-nat-Daten miteinander graphisch verglichen werden, um den Effekt des Klimawandels qualitativ darzustellen.

Da die Modelle meist einen systematischen Fehler (Bias) aufweisen, wird noch eine Bias-Korrektur vorgenommen. Für die Modellauswertungen wird deshalb nicht der $TM3n$ -Wert gewählt, der im Februar 2021 in Berlin-Dahlem beobachtet worden ist, sondern die Eintrittswahrscheinlichkeit dieses Wertes, welcher aus der GEV-Verteilung der beobachteten $TM3n$ von Berlin-Dahlem ermittelt werden kann. Für diese Wahrscheinlichkeit wird dann der $TM3n$ -Wert in den historical-Läufen der jeweiligen Modelle berechnet ($TM3n^{historical}$). Für diesen so ermittelten Wert kann die Eintrittswahrscheinlichkeit für diese Temperatur in den hist-nat-Läufen ermittelt werden, sodass letztlich zwei Wahrscheinlichkeiten vorliegen.

Um auch die Unsicherheit der Modelle abschätzen zu können, wird noch ein 1000-facher Bootstrap durchgeführt. Für einen Bootstrap werden aus den Datensätzen zufällig genauso viele Werte gezogen, wie im Datensatz vorhanden sind, und jeweils die Eintrittswahrscheinlichkeit des $TM3n^{historical}$ berechnet, welcher aus dem originalen historical-Datensatz ermittelt wurde. Dies wird 1000-mal wiederholt und für jeden der 1000 Datensätze werden die GEV-Parameter bestimmt. Aus diesen GEV-Parametern lässt sich dann 1000-mal die Eintrittswahrscheinlichkeit jeweils für die historical- und die hist-nat-Simulationen bestimmen, sodass ein Unsicherheitsbereich angegeben werden kann.

Um schließlich die Wahrscheinlichkeiten zwischen den beiden Simulationen vergleichen zu können, wird aus diesen ein Quotient gebildet. Dieser Quotient gibt die Veränderung der Eintrittswahrscheinlichkeit für ein Ereignis an und wird *Probability Ratio* genannt. Dafür wird die Wahrscheinlichkeit der historical-Läufe durch die aus den hist-nat-Läufen geteilt. So ergibt sich am Ende im Idealfall ein Faktor mit einem Unsicherheitsbereich.

In einigen Fällen kann es allerdings auch vorkommen, dass erst während der Analyse festgestellt wird, dass die Menge an Daten nicht ausreicht oder das gewählte Ereignis nicht von den Klimamodellen dargestellt werden kann. Der aus den Wahrscheinlichkeiten ermittelte Faktor stellt dar, welchen Einfluss der anthropogene Klimawandel auf Kälteereignisse dieser Art hat, beziehungsweise wie stark sich die Eintrittswahrscheinlichkeit für ein Kälteereignis wie im Februar 2021 oder kälter verändert hat.

Ergebnisse: Messwerte und E-OBS

Wenn nur die berechneten $TM3n$ für Berlin-Dahlem und den E-OBS Datensatz in der Zeitreihe in der Abbildung 2 betrachtet werden, wird deutlich, dass es sich bei dem Kälteeinbruch im Februar 2021 mit einem $TM3n$ von $-8,4^{\circ}\text{C}$ um kein besonders extremes Ereignis gehandelt hat.

Vielmehr ist es ein Ereignis, dass alle zwei bis drei Jahre auftritt. Kälter war es zum Beispiel 2010 und 2012.

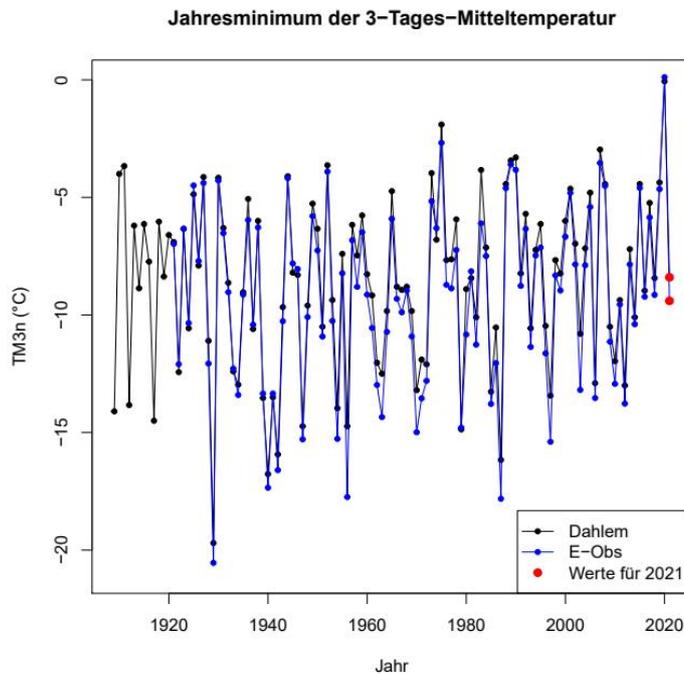


Abbildung 2: $TM3n$ an der Wetterstation Berlin-Dahlem und aus dem E-Obs Datensatz.

Auch bei der Auswertung der Wiederkehrzeiten ergibt sich ein ähnliches Bild: Die Wahrscheinlichkeit liegt für den Zeitraum vom 1991 bis 2020 bei 0,43 (und damit einer Wiederkehrzeit von 2,33 Jahren) für die Messwerte aus Dahlem und bei 0,40 beim E-OBS Datensatz. In der Abbildung 2 wird

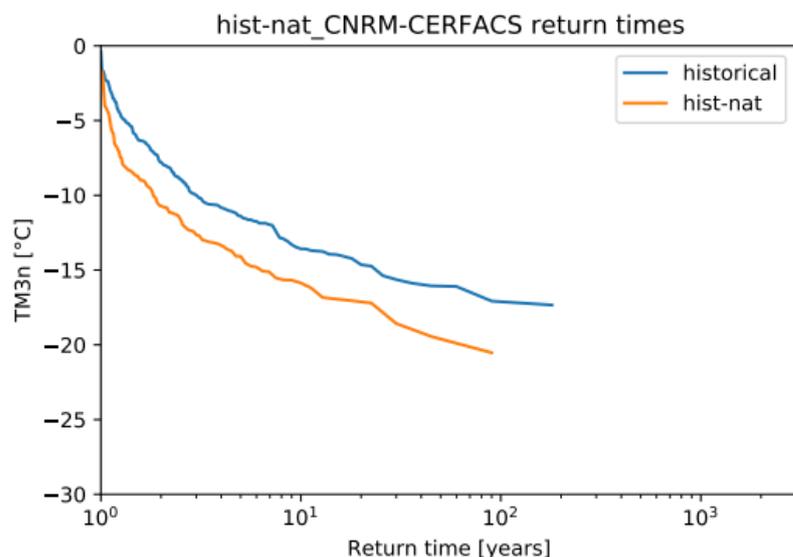
außerdem ersichtlich, dass die Messwerte aus Dahlem und der E-OBS Datensatz vor allem bei den Kälteextremen Unterschiede aufweisen. Das Phänomen der meist wärmeren Messstation lässt sich hierbei auf den Stadteffekt zurückführen. Da sich die Wahrscheinlichkeiten und auch die GEV-Verteilungen nicht stark unterscheiden, wird hierbei die Station Berlin-Dahlem weiterhin verwendet.

Insgesamt ist außerdem sichtbar, dass die stärkeren Kälteextreme von unter -15°C immer seltener werden und im aktuellen Referenzzeitraum von 1991 bis 2020 zumindest in Berlin-Dahlem sogar gar nicht auftreten. Dementsprechend kann hier schon die These aufgestellt werden, dass es auch bei den Kälteeinbrüchen im Winter eine Tendenz zu höheren Temperaturen gibt.

Ergebnisse: Klimamodelle

Um die Klimamodelle auszuwerten, wurden zuerst iterativ die Wiederkehrzeiten für jedes Modell jeweils für die historical- und die hist-nat-Simulationen bestimmt, was beispielhaft in der Abbildung 3 gezeigt wird. Dort ist bereits eine deutliche Verschiebung in wärmere Bereiche festzustellen, beziehungsweise ein Trend dazu, dass kältere Ereignisse seltener werden.

Abbildung 3: Wiederkehrzeiten für die historical- und hist-nat-Simulationen des Modells von CNRM-CERFACS



Um dies noch besser einschätzen zu können, wurden die GEV-Parameter für die jeweiligen Datensätze berechnet und mit den GEV-Verteilungen und Histogrammen graphisch in Abbildung 4 dargestellt. Auch hier ist die angesprochene Verschiebung in allen Modellen mehr oder weniger deutlich zu erkennen. Für die jeweiligen GEV-Parameter der historical-Läufe kann nun bestimmt werden, welcher $TM3n^{historical}$ die gleiche Eintrittswahrscheinlichkeit von 0,43 besitzt wie der Wert aus Berlin-Dahlem. Dieser liegt in dem Modell von CCCma beispielsweise bei $-9,66^{\circ}\text{C}$. Aus dem jeweils ermittelten Wert kann dann für jedes Modell die Eintrittswahrscheinlichkeit für die hist-nat-Läufe berechnet werden.

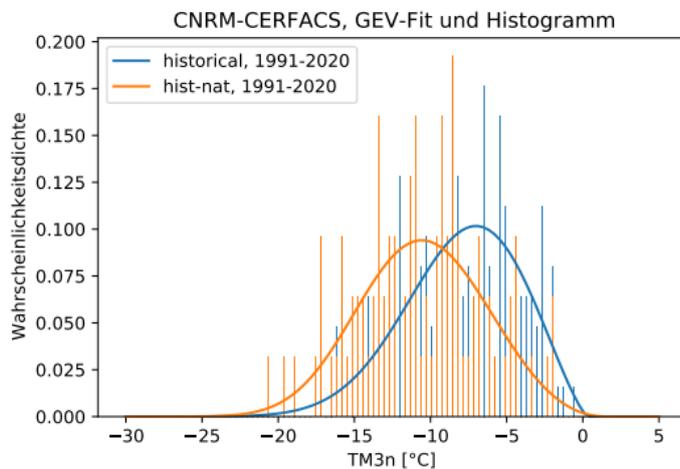


Abbildung 4: Histogramm und GEV-Verteilungen für die historical- und hist-nat-Simulationen des Modells von CNRM-CERFACS

Dies wird durch den Bootstrap insgesamt 1000-mal wiederholt, um einen Fehlerbereich zu erhalten. Um die Extremvarianten zu vernachlässigen, werden als Grenzen das 0,05 und 0,95 Quantil verwendet. Dargestellt ist das Ergebnis dieser Berechnungen in Abbildung 5. Dort ist zu

erkennen, dass das *Probability Ratio* für alle Modelle kleiner als 1 ist, was bedeutet, dass derartige $TM3n$ insgesamt seltener geworden sind, das heißt, wir erleben im Berliner Raum heutzutage also

weniger Perioden in denen die Temperatur über drei Tage gemittelt unter $-8,4^{\circ}\text{C}$ liegt als dies in einer Welt ohne menschengemachten Klimawandel der Fall wäre.

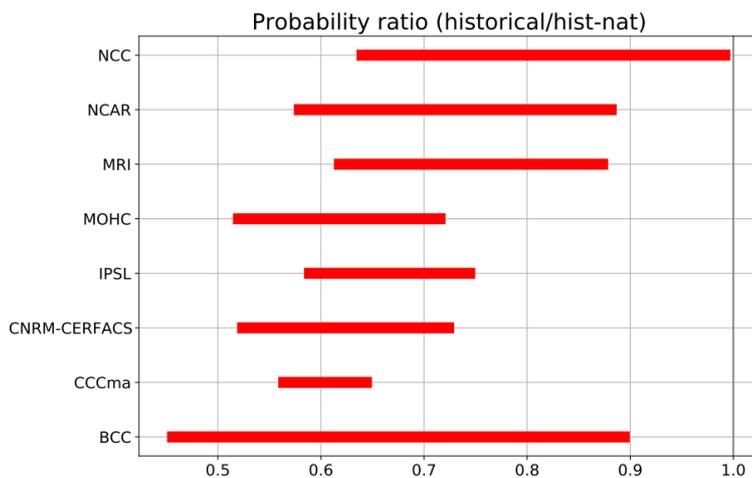


Abbildung 5: Berechnete Probability Ratios der einzelnen globalen Klimamodelle der CMIP6-Generation für den Berliner Raum

Zusammenfassung und Diskussion

In der Bachelorarbeit wurde ermittelt, inwiefern die Wahrscheinlichkeit eines Kälteereignisses, wie es sich im Februar 2021 im Berliner Raum ereignete, durch anthropogene Effekte verändert wurde. Dafür wurden neben gemessenen Temperaturen und dem E-OBS Datensatz auch die Daten von Klimamodellen verwendet. Die Auswertung dieser Klimamodelle ergab eine Abnahme der Eintrittswahrscheinlichkeiten eines solchen Ereignisses. Auch wenn sich die Modelle zum Teil unterschieden, ergibt sich eine Schnittmenge von einem *Probability Ratio* von 0,5 bis 0,75; im Gesamtergebnis betrachtet liegen alle *Probability Ratios* zwischen 0,45 und 1,00. Das bedeutet, wenn es in einer Welt ohne menschengemachten Klimawandel (oder in der vorindustriellen Zeit) in einem festgelegten Zeitraum 10 Winter mit $TM3n$ wie im Februar 2021 oder kälter gegeben hatte, sind es im aktuellen Klima nur noch im Durchschnitt 5 bis 7,5 Winter dieser Art, beziehungsweise 4,5 bis 10 Winter, wenn alle Bereiche berücksichtigt werden.

Allerdings sind nicht alle verwendeten Modelle gleich belastbar. Für das Modell von BCC liegt beispielsweise nur ein historical-Lauf vor, also insgesamt zu wenig Daten, beim Modell von NCAR

existieren die hist-nat-Läufe nur bis 2015. Auch ist zu erkennen, dass die Modelle mit den meisten vorhandenen Läufen einen geringeren Unsicherheitsbereich besitzen, dazu zählen vor allem die Modelle von CCCma, CNRM-CERFACS und IPSL. Diese liegen ebenfalls hauptsächlich im Bereich zwischen 0,5 und 0,75. Insgesamt sind solche Kälteeinbrüche also im aktuellen Klima seltener geworden.

Ausblick

Die Auswertungen für dieses Kälteereignis sind nur ein Teil der möglichen Auswertungen, die normalerweise in Extremwetterattributionstudien durchgeführt werden. Dabei wurde der Prozess der Modellvalidierung übersprungen, bei dem überprüft wird, ob der Skalenparameter und der Formparameter der GEV-Verteilungen der Modelle mit den Verteilungen der Wetterstationsdaten beziehungsweise des E-OBS Datensatzes übereinstimmen und somit die Klimamodelle die Temperaturen in der analysierten Region gut repräsentieren.

Weiterhin lässt sich das *Probability Ratio* mit den gleichen Methoden zum Beispiel auch über verschiedene Zeiträume bestimmen (zum Beispiel 1851-1880 im Vergleich zu 1991-2020), für die gemessenen Werte an der Wetterstation, aber auch für den E-OBS Datensatz. Wenn diese mit den Ergebnissen der Modelle zusammengeführt werden, ergibt sich noch ein viel belastbareres Ergebnis.

Zusätzlich könnte auch mit den Szenarien der Klimamodelle in die andere Richtung, also in die Zukunft geschaut werden, wie sich die Wahrscheinlichkeiten bis 2100 verändern werden.

Die Möglichkeiten der Auswertung sind umfangreich. Doch auch die hier vorgestellte Studie zeigt schon, dass Kälteereignisse um etwa ein Drittel unwahrscheinlicher geworden sind, als sie es in einer Welt wären, in der es keinen anthropogenen Klimawandel gäbe.

Literatur

OTTO, FRIEDERIKE (Okt. 2017). „Attribution of Weather and Climate Events“. In: *Annual Review of Environment and Resources* 42.1, S. 627–646. doi: 10.1146/annurev-environ-102016-060847.

PHILIP, SJOUKJE, SARAH KEW, GEERT JAN VAN OLDENBORGH, FRIEDERIKE OTTO, ROBERT VAUTARD, KARIN VAN DER WIEL, ANDREW KING, FRASER LOTT, JULIE ARRIGHI, ROOP SINGH UND MAARTEN VAN AALST (Nov. 2020). „A protocol for probabilistic extreme event attribution analyses“. In: *Advances in Statistical Climatology, Meteorology and Oceanography* 6.2, S. 177–203. doi: 10.5194/ascmo-6-177-2020.

PHILIP, SJOUKJE, SARAH KEW, GEERT JAN VAN OLDENBORGH, WENCHANG YANG, GABRIEL A. VECCHI, FARON S. ANSLOW, SIHAN LI, SONIA I. SENEVIRATNE, LINH N. LUU, JULIE ARRIGHI, ROOP SINGH, MAARTEN VAN AALST, MATHIAS HAUSER, DOMINIK L. SCHUMACHER, CAROLINA PEREIRA MARGHIDAN, KRISTIE L EBI, RÉMY BONNET, ROBERT VAUTARD, JORDIS TRADOWSKY, DIM COUMOU, FLAVIO LEHNER, MICHAEL WEHNER, CHRIS RODELL, ROLAND STULL, ROSIE HOWARD, NATHAN GILLET UND FRIEDERIKE OTTO (7. Juli 2021). „Rapid attribution analysis of the extraordinary heatwave on the Pacific Coast of the US and Canada June 2021“. [url: https://www.worldweatherattribution.org/wp-content/uploads/NW-USextreme-heat-2021-scientific-report-WWA.pdf](https://www.worldweatherattribution.org/wp-content/uploads/NW-USextreme-heat-2021-scientific-report-WWA.pdf) (besucht am 15. 07. 2021).

SCHRÖTER, JONAS (Aug. 2021). „Attribution eines Kälteereignisses im Berliner Raum“. Unveröffentlichte Bachelorarbeit, Institut für Meteorologie, Freie Universität Berlin.

STOTT, PETER A., D. A. STONE UND MYLES R. ALLEN (Dez. 2004). „Human contribution to the European heatwave of 2003“. In: *Nature* 432.7017, S. 610–614. doi: 10.1038/nature03089.

Die vollständige Arbeit wurde im August 2021 als Bachelorarbeit am Institut für Meteorologie der Freien Universität Berlin vorgelegt.