

Kurzpapier des Klima-Sachverständigenrats

21|03|2023

Klimawandelbedingter Lufttemperaturanstieg
in Baden-Württemberg seit 1881

Maike Schmidt

Dirk Schindler

Almut Arneth

Sven Kesselring

Sabine Löbbe

Martin Pehnt

Klima-Sachverständigenrat:

Dipl.-Ing. Maike Schmidt (Vorsitzende)

Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW)

Meitnerstr. 1, 70563 Stuttgart

E-Mail: maike.schmidt@zsw-bw.de

Telefon: +49 711 78 70-250

Professor Dr. Dirk Schindler (Stellvertretender Vorsitzender)

Albert-Ludwigs-Universität Freiburg

Werthmannstrasse 10, 79085 Freiburg

E-Mail: dirk.schindler@meteo.uni-freiburg.de

Telefon: +49 761 203 3588

Professor Dr. Almut Arneth

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Kreuzeckbahnstraße 19, 82467 Garmisch-Partenkirchen

E-Mail: almut.arneth@kit.edu

Telefon: +49 8821 183-131

Professor Dr. Sven Kesselring

Hochschule für Wirtschaft und Umwelt Nürtingen-Geislingen (HfWU)

Parkstraße 4, 73312 Geislingen

E-Mail: sven.kesselring@hfwu.de

Telefon: +49 7331 22525

Professor Dr. Sabine Löbbe

Hochschule Reutlingen

Alteburgstraße 150, 72762 Reutlingen

E-Mail: sabine.loebbe@reutlingen-university.de

Telefon: +49 7121 271-7127

Dr. Martin Pehnt

Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg gGmbH (ifeu)

Wilckensstraße 3, 69120 Heidelberg

E-Mail: martin.pehnt@ifeu.de

Telefon: +49 6221 4767 0

Diese Stellungnahme beruht auch auf der sachkundigen und engagierten Arbeit unserer wissenschaftlichen Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter:

Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW): **Laura Liebhart**

Albert-Ludwigs-Universität Freiburg: **Dr. Christopher Jung**

Karlsruher Institut für Technologie (KIT): **Tobias Laimer**

Hochschule für Wirtschaft und Umwelt Nürtingen-Geislingen (HfWU): **Claus Seibt**

Hochschule Reutlingen: **Dr. André Hackbarth**

Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg gGmbH (ifeu): **Dr. Sara Ortner**

Inhalt

Inhalt.....	3
I. Zusammenfassung	4
II. Hintergrund.....	5
III. Lufttemperatur als Leitgröße für den menschengemachten Klimawandel	5
IV. Klimawandelbedingter Lufttemperaturanstieg in Baden- Württemberg	7
V. Schlussfolgerungen.....	12
VI. Literaturverzeichnis	13

I. Zusammenfassung

In seiner Beratungsfunktion für die Landesregierung und den Landtag Baden-Württemberg legt der Klima-Sachverständigenrat Baden-Württemberg mit dem vorliegenden Kurzpapier eine Analyse zur Entwicklung der Lufttemperatur in Baden-Württemberg seit 1881 vor. Die Ergebnisse untermauern eindrücklich die Dringlichkeit einer zielorientierten, konsistenten und umfassenden Umsetzung von Klimaschutzmaßnahmen.

Im Zeitraum 1881-2022 war das Jahr 2022 mit einer mittleren Lufttemperatur von 10,6 °C das wärmste Jahr in Baden-Württemberg. Infolge des globalen Klimawandels ist die vieljährige Lufttemperatur, die die klimawandelbedingte Erwärmung widerspiegelt, von 7,7 °C auf 10,0 °C gestiegen (Abbildung 1). Der Anstieg um 2,3 °C entspricht etwa dem Zweifachen des mittleren globalen Lufttemperaturanstiegs von 1,1 °C. Darüber hinaus fand eine Beschleunigung der durchschnittlichen 10-jährigen Lufttemperaturänderung in den vergangenen vier Jahrzehnten auf über 0,4 °C statt. Damit hat sich die Lufttemperatur im Land allein in den letzten 40 Jahren um mindestens 1,6 °C erhöht. Unterstellt man diese Änderungsrate bis zum Jahr 2040 – das Jahr, in dem Baden-Württemberg zum Zwecke des Klimaschutzes Netto-Treibhausgasneutralität erreichen will – wird der klimawandelbedingte Lufttemperaturanstieg rund 3,0 °C betragen.

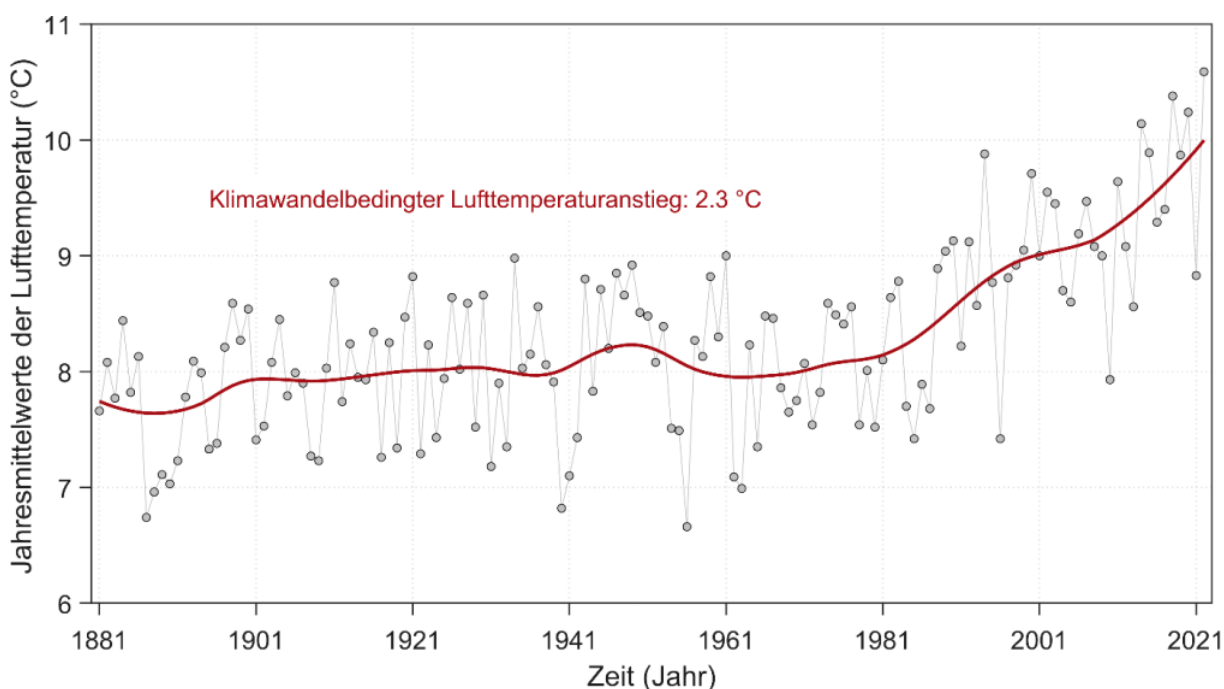


Abbildung 1: Klimawandelbedingter Lufttemperaturanstieg um 2,3 °C im Zeitraum 1881-2022 in Baden-Württemberg. Die Lufttemperaturdifferenz von 2,3 °C ergibt sich entlang der roten Kurve zwischen den Jahren 1881 und 2022.

Durch den regionalen Klimawandel ändert sich die Lufttemperatur in Baden-Württemberg deutlich stärker als im globalen Durchschnitt. So ist zukünftig mit deutlich höheren Lufttemperaturwerten im gesamten Jahresverlauf zu rechnen. Dies führt zur eingeschränkten Entwicklung von Schneedecken im Winter, zur Verlängerung der Vegetationsperioden in Frühjahr und Herbst sowie zu deutlich mehr und intensiverer Hitzebelastung im Sommer. Gerade deshalb muss die sich auf

Baden-Württemberg auswirkende Lufttemperaturänderung der Maßstab für jedwedes, dringend erforderliches Klimaschutz- und Klimawandelanpassungshandeln sein.

Zur Bekämpfung des Klimawandels mit dem Ziel der Abschwächung des klimawandelbedingten Lufttemperaturanstiegs müssen alle Teile der Gesellschaft Baden-Württembergs aktiv zur Einhaltung der im KlimaG formulierten Klimaschutzziele beitragen. Zusammen mit einer stringenten Klimawandelanpassungsstrategie ist dies die Grundvoraussetzung dafür, dass Baden-Württemberg für zukünftige Generationen als starker Wirtschaftsstandort und lebenswertes Land erhalten werden kann.¹

II. Hintergrund

Der Klima-Sachverständigenrat ist ein gemäß § 17 des Klimaschutzgesetzes Baden-Württemberg berufenes, unabhängiges Expertengremium, dessen Aufgabe es ist, die Landesregierung und den Landtag wissenschaftsbasiert, systemorientiert und sektorübergreifend zu Fragen des Klimaschutzes zu beraten. Im Rahmen dieser Beratungsfunktion kann der Klima-Sachverständigenrat auf eigenen Entschluss zu ausgewählten Themen eigenständig Papiere, Stellungnahmen oder Berichte gegenüber der Landesregierung und dem Landtag abgeben. Von diesem Recht macht der Klima-Sachverständigenrat mit dem vorliegenden Kurzpapier „Klimawandelbedingter Lufttemperaturanstieg in Baden-Württemberg seit 1881“ Gebrauch.

Der Klima-Sachverständigenrat zeigt mit diesem Papier auf, wie dynamisch sich der Klimawandel in Baden-Württemberg insbesondere in den letzten Dekaden entwickelt hat – eine Tatsache, die in den meisten Berichterstattungen bisher zu wenig Beachtung findet.

Mit diesem Papier werden aktuelle Informationen zur regionalen Lufttemperaturentwicklung präsentiert und die sich hieraus erwachsende Bedrohungslage für Baden-Württembergs Wirtschaft und Gesellschaft klar benannt. Der Klima-Sachverständigenrat weist damit auf die Dringlichkeit hin, mit welcher politische Entscheidungen und wirkungsvolles Regierungshandeln für mehr Klimaschutz und wirkungsvolle Klimawandelanpassung verfolgt werden müssen, um Baden-Württemberg als Wirtschaftsstandort und als lebenswertes Land zu erhalten.

III. Lufttemperatur als Leitgröße für den menschengemachten Klimawandel

Die Lufttemperatur ist eine Leitgröße, die verwendet wird, um die Veränderung des Klimas zu messen. Sie gibt an, wie warm die Atmosphäre an einem Ort oder in einer Region ist. Der Anstieg der mittleren globalen Lufttemperatur seit dem Beginn der Industrialisierung ist ein wichtiger Indikator für den menschengemachten globalen Klimawandel, da er durch die Zunahme der menschenverursachten Treibhausgaskonzentrationen in der Atmosphäre verursacht wird. Die seit

¹ Schmidt et al., Zum Entwurf des Klimaschutz- und Klimawandelanpassungsgesetzes (KlimaG). Stellungnahme des Klimasachverständigenrats, 2022

Jahrzehnten mess- und beobachtbaren Auswirkungen des menschengemachten Klimawandels, wie z. B. die Veränderung des Niederschlags, das Auftreten von Hitzewellen, das Abschmelzen der Gletscher, die Verschiebung von Vegetationszonen und der Meeresspiegelanstieg, sind direkt oder indirekt auf die Erwärmung der Erde zurückzuführen.²

Da die Konzentrationen der wichtigsten, vom Menschen freigesetzten Treibhausgase Kohlenstoffdioxid (CO₂) und Methan (CH₄) in der Atmosphäre bis Ende des Jahres 2022 weiter gestiegen sind³, wird sich die Lufttemperatur zukünftig weiter erhöhen. Aufgrund der langen Verweilzeit von CO₂ in der Atmosphäre, die mehrere Jahrzehnte bis Jahrtausende betragen kann⁴, ist ein Rückgang der Lufttemperatur auf ein Niveau, das dem vorindustriellen Niveau nahe kommt, selbst bei einem sofortigen globalen Stopp der Treibhausgasemissionen bis zum Ende des 21. Jahrhunderts nicht erreichbar.

Eine rasche, drastische Reduktion der menschenverursachten Treibhausgasemissionen kann den klimawandelbedingten Lufttemperaturanstieg jedoch abschwächen und ist daher eine Grundvoraussetzung für die Erhaltung eines Klimas, das der Menschheit weiterhin ein Leben auf dem Niveau ihrer bisherigen Lebensstile ermöglicht und nicht nur das bloße Überleben zulässt. Um den klimawandelbedingten Lufttemperaturanstieg eindämmen und allmählich rückgängig machen zu können, müssen, neben dem bestenfalls vollständigen Emissionsstopp der Atmosphäre zusätzlich enorme CO₂-Mengen entzogen werden, um die Klimawirkung von auf absehbare Zeit schwer vermeidbaren menschengemachten Treibhausgasemissionen zu mindern.

Infolge des menschengemachten Klimawandels hat sich die mittlere globale Lufttemperatur bis zum Jahr 2020 um 1,1 °C gegenüber dem Referenzzeitraum 1850-1900 erhöht. Die stärkste Erhöhung hat in den letzten vier Jahrzehnten stattgefunden. Sie war allerdings nicht überall gleichstark ausgeprägt. Während die Lufttemperatur über den Festlandsflächen um 1,6 °C gestiegen ist, hat sie sich über den Meeresoberflächen um 0,9 °C erhöht.¹ In Europa ist die mittlere Lufttemperatur seit dem Zeitraum 1850-1900 um 2,2 °C fast doppelt so stark gestiegen wie der globale Mittelwert im gleichen Zeitraum.⁵ In den Jahren 1991-2021 hat sich Europa durch den mittleren Anstieg von 0,5 °C pro Jahrzehnt stärker erwärmt als alle anderen Kontinente.⁶

Europa ist ein Hotspot des menschengemachten Klimawandels. Der enorme Lufttemperaturanstieg hat bereits zu deutlich sicht- und spürbaren Umweltveränderungen geführt. Da sich die rasche Erwärmung in den kommenden Jahrzehnten fortsetzen wird, ist mit weiteren schwerwiegenden Umweltveränderungen, wie mehr außergewöhnlichen Hitzetagen, längeren und ausgeprägteren Trockenheitsphasen (Stichwort „Winterdürre“ in Frankreich), mehr Waldbränden und mehr Hochwasser in allen Teilen Europas zu rechnen.

Aufgrund des sich in den vergangenen vier Jahrzehnten dramatisch beschleunigten Lufttemperaturanstiegs in Europa, hat der Klima-Sachverständigenrat in Abstimmung mit dem Kompetenzzentrum Klimawandel der Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (LUBW) die klimawandelbedingte Lufttemperaturentwicklung im Zeitraum 1881-2022 in Baden-Württemberg untersucht, um deutlich zu machen, dass für Entscheidungen zum Klimaschutz und zur Klimawandelanpassung, nicht nur der globale mittlere Lufttemperaturanstieg Maßstab für die Umsetzung von dringend

² IPCC, Summary for Policymakers 2021

³ C3S, Globe, 2023

⁴ Ciais et al., Carbon and Other Biogeochemical Cycles, 2013

⁵ C3S, Climate Key Indicators: Temperature, 2023

⁶ WMO, State of the Climate in Europe 2021, 2022

erforderlichen Maßnahmen sein darf, sondern auch die deutlich stärker ausgeprägte regionale Lufttemperaturveränderung in Baden-Württemberg das Klimaschutz- und Klimawandelanpassungshandeln leiten muss.

IV. Klimawandelbedingter Lufttemperaturanstieg in Baden-Württemberg

Für die Analyse des klimawandelbedingten Lufttemperaturanstiegs in Baden-Württemberg wurden jährliche Gebietsmittelwerte verwendet, die der Deutsche Wetterdienst (DWD) über das Climate Data Center (CDC) veröffentlicht.⁷ Die jährlichen Gebietsmittelwerte stehen für die Bundesländer und Kombinationen von Bundesländern für den Zeitraum 1881-2022 zur Verfügung.

Von den Gebietsmittelwerten wurden jährliche Abweichungen (Anomalien) berechnet. Der Berechnung der Lufttemperaturabweichungen wurden die 30-jährigen Lufttemperaturmittelwerte der drei Klimareferenzzeiträume 1881-1910, 1961-1990 und 1991-2020 zugrunde gelegt. Die beiden Zeiträume 1961-1990 und 1991-2020 sind sogenannte Klimanormalperioden. Diese werden von der Weltorganisation für Meteorologie (WMO) festgelegt und dienen international als Bezugszeiträume für die Auswertung von Klimadaten⁷. Die Durchführung der folgenden Auswertung für die drei Klimareferenzzeiträume soll Informationen darüber liefern, ob die Verwendung eines Bezugszeitraums einen Einfluss auf die Ergebnisse hat oder nicht. Durch die Verwendung jährlicher Abweichungen sind die im Folgenden präsentierten Ergebnisse mit Ergebnissen aus anderen Untersuchungen vergleichbar.

Zusammen mit den drei 30-jährigen Lufttemperaturmittelwerten sind in Abbildung 2a die jährlichen Mittelwerte der Lufttemperatur im Zeitraum 1881-2022 in Baden-Württemberg veranschaulicht. Im ersten Klimareferenzzeitraum 1881-1910 beträgt die mittlere jährliche Lufttemperatur 7,8 °C. Sie steigt bis zum zweiten Klimareferenzzeitraum 1961-1990 um 0,3 °C auf 8,1 °C. Im dritten Klimareferenzzeitraum ist die mittlere Lufttemperatur um 1,1 °C auf 9,2 °C gestiegen. Die Differenz zwischen dem ersten und dem dritten 30-jährigen Lufttemperaturmittelwert beträgt damit 1,4 °C.

Das wärmste Jahr in Baden-Württemberg war 2022 mit einem Lufttemperaturmittelwert von 10,6 °C. Ein ähnlich warmes Jahr war 2018, in dem eine mittlere Lufttemperatur von 10,4 °C auftrat. In den Jahren 2020 (10,2 °C) und 2014 (10,1 °C) war die mittlere Lufttemperatur ebenfalls höher als 10,0 °C.

Der starke Anstieg des 30-jährigen Lufttemperaturmittelwertes 1991-2020 gegenüber dem Mittelwert 1881-1910 bewirkt im Untersuchungszeitraum die Abnahme der positiven jährlichen Lufttemperaturabweichungen von 104 (Abbildung 2b) auf 15 (Abbildung 2d). Dies bedeutet, dass im Untersuchungszeitraum nur noch 15 Jahre wärmer waren als der Lufttemperaturmittelwert 1991-2020. 14 der 15 wärmsten Jahre traten nach 1999 auf.

⁷ DWD-CDC, Jährliche Gebietsmittel der Lufttemperatur (Jahresmittel) in °C (2 m Höhe), 2023

Bezogen auf die folgenden Ergebnisse hat die Verwendung unterschiedlicher Klimareferenzzeiträume keinen Einfluss auf die zeitliche Entwicklung der jährlichen Abweichungen im Untersuchungszeitraum, da lediglich drei 30-jährige Mittelwerte zur Bildung der Abweichungen verwendet werden. Da die WMO die Verwendung der Klimanormalperiode 1961-1990 als Referenzperiode für Klimaanalysen empfiehlt⁸, und dies der DWD für Deutschland zur Analyse des Klimawandels umsetzt⁹, basieren alle weiteren Ergebnisse auf diesem Zeitraum.

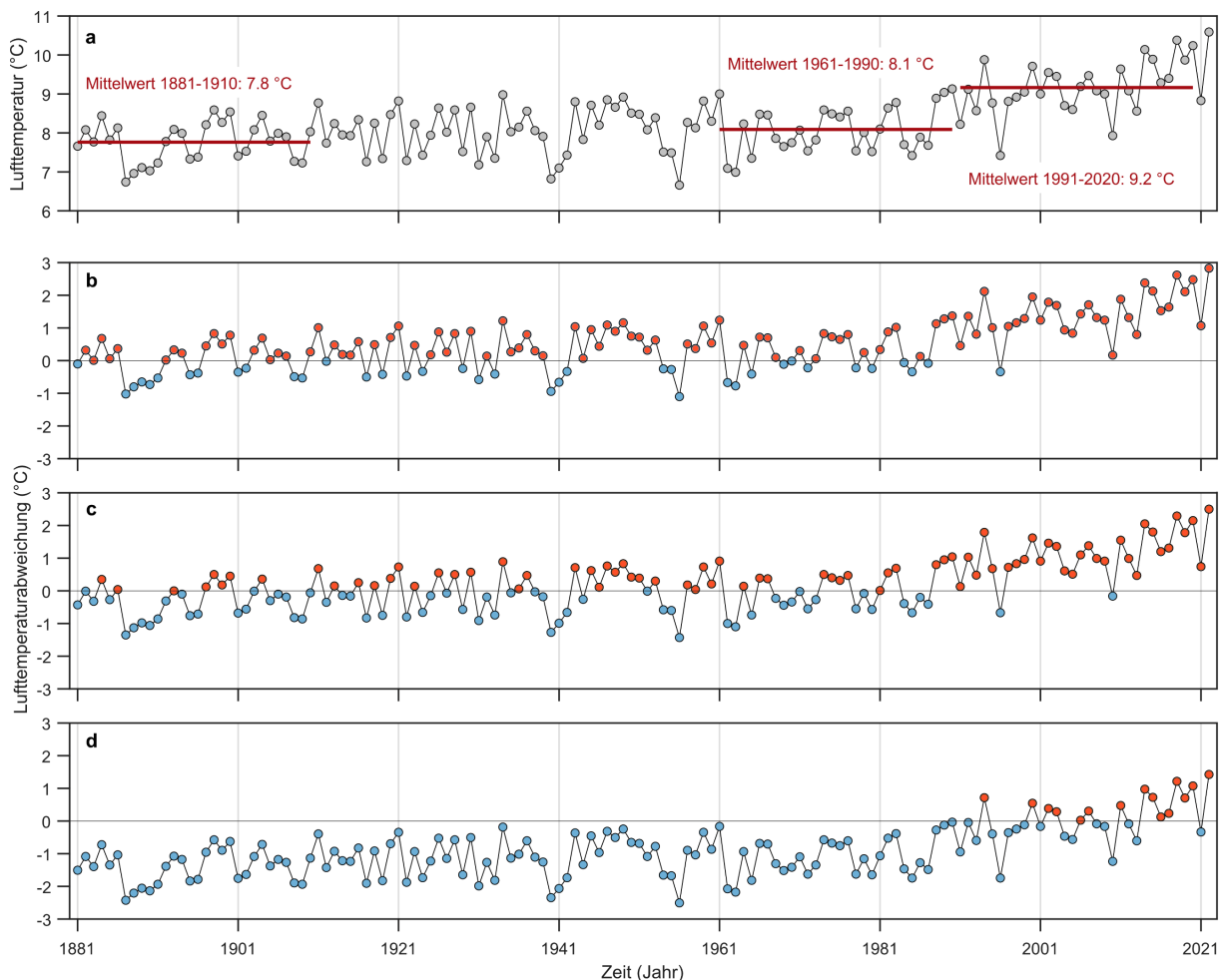


Abbildung 2: (a) Jährliche Mittelwerte der Lufttemperatur im Zeitraum 1881-2022 in Baden-Württemberg. Jährliche Lufttemperaturabweichungen vom 30-jährigen Mittelwert in den Zeiträumen (b) 1881-1910, (c) 1961-1990 und (d) 1991-2020. Positive Abweichungen von den jeweiligen 30-jährigen Mittelwerten sind in Rot gekennzeichnet. Negative Abweichungen sind blau markiert.

Aus der Abbildung 2 geht hervor, dass sich der Lufttemperaturanstieg hin zur Gegenwart beschleunigt hat. Eine Trendgerade, die über den gesamten Untersuchungszeitraum zur Quantifizierung des linearen klimawandelbedingten Lufttemperaturanstiegs berechnet wird, kann diese Beschleunigung nicht abbilden, da sie über ihre Steigung für alle Jahre eine konstante Lufttemperaturänderung wiedergibt und damit den sich beschleunigenden klimawandelbedingten

⁸ WMO, WMO Guidelines on the Calculation of Climate Normals, 2017

⁹ Kaspar et al., Nutzung klimatologischer Referenzperioden ab 2021, 2021

Lufttemperaturanstieg vor allem seit den 1980er Jahren in Baden-Württemberg unterschätzt. Entlang dieser Gerade steigt die Lufttemperatur im gesamten Untersuchungszeitraum klimawandelbedingt um $1,6\text{ °C an}^{10}$.

Berechnet man über immer kürzere Zeiträume Trendgeraden, kann man die Beschleunigung des klimawandelbedingten Lufttemperaturanstiegs in Baden-Württemberg veranschaulichen. In Abbildung 3 sind vier Trendgeraden für die Zeiträume 1881-2022, 1921-2022, 1951-2022 und 1981-2022 dargestellt. Die Steigung der Trendgeraden erhöht sich mit kürzer werdendem Zeitraum, für den die Trendgeraden berechnet wurden.

Der mittlere klimawandelbedingte Lufttemperaturanstieg beläuft sich im gesamten Untersuchungszeitraum in Baden-Württemberg pro Jahrzehnt auf $0,11\text{ °C}$. Im verkürzten Zeitraum 1921-2022 beträgt der mittlere dekadische Lufttemperaturanstieg $0,16\text{ °C}$. Ab dem Jahr 1951 steigt der mittlere 10-jährige Lufttemperaturwert bedingt durch den menschengemachten Klimawandel um $0,28\text{ °C}$. Der größte klimawandelbedingte Lufttemperaturanstieg ergibt sich mit $0,41\text{ °C}$ pro Jahrzehnt ab 1981 entlang der entsprechenden Trendgeraden, woraus eine Gesamterhöhung der Lufttemperatur von mindestens $1,6\text{ °C}$ in den vergangenen 40 Jahren resultiert. Unterstellt man diese Änderungsrate bis zum Jahr 2040, in dem Baden-Württemberg Netto-Treibhausgasneutralität erreichen möchte, dann wird sich die Lufttemperatur klimawandelbedingt um weitere $0,70\text{ °C}$ auf rund $3,0\text{ °C}$ erhöht haben.

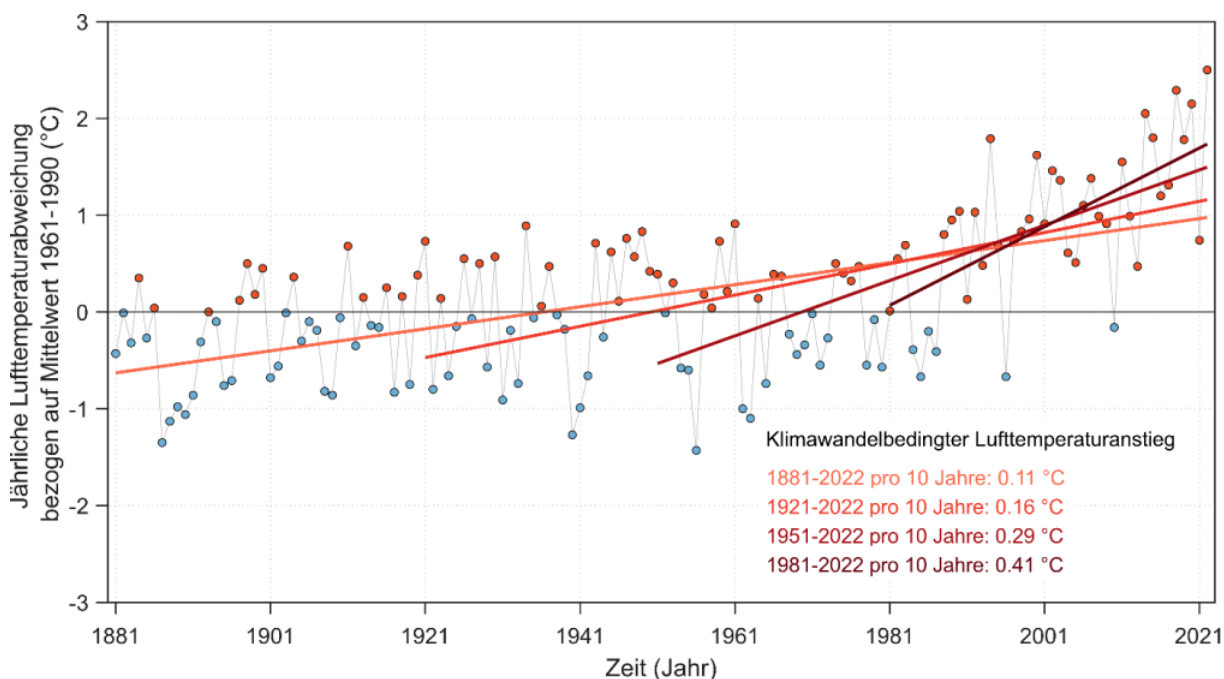


Abbildung 3: Klimawandelbedingter Lufttemperaturanstieg in Baden-Württemberg in den Zeiträumen 1881-2022 (142 Jahre), 1921-2022 (102 Jahre), 1951-2022 (72 Jahre) und 1981-2022 (42 Jahre) quantifiziert entlang von Geraden. Datengrundlage sind die jährlichen Lufttemperaturanomalien, die sich gegenüber dem Klimareferenzzeitraum 1961-1990 ergeben. Aus der mittleren jährlichen Steigung der Geraden wurde die jeweilige mittlere 10-jährige Lufttemperaturänderung berechnet.

¹⁰ LUBW, SO sonnig und warm wie noch nie, 2023

Zur Nachbildung von 30-jährigen Schwankungen, die Ausdruck des klimawandelbedingten Lufttemperaturanstiegs sind, wurden lokal gewichtete Regressionsanalysen (LGR) durchgeführt. Im Gegensatz zu einfachen Regressionsanalysen, bei denen Geraden zur Quantifizierung der klimawandelbedingten Lufttemperaturänderung verwendet werden, sind lokal gewichtete Regressionsanalysen zur Nachbildung von klimawandelrelevanten Skalen in Lufttemperaturzeitreihen geeignet.¹¹ Die Skalennachbildung erfolgt durch Anpassung einfacher polynomialer Regressionsmodelle an jeweils 30-jährige Teilmengen der Lufttemperaturdaten. Es wird demnach keine Funktion verwendet, die an die Gesamtheit der Daten angepasst wird.

Da das „wahre“ LGR-Modell grundsätzlich unbekannt ist, wurden zunächst jeweils acht Regressionsmodelle auf der Grundlage eines Polynoms ersten und zweiten Grades mit verschiedenen 30-jährigen Kernfunktionen¹² an die baden-württembergische Lufttemperaturzeitreihe angepasst (Tabelle 1). Die Varianzerklärung und Anpassungsgüte der LGR-Modelle wurden über das Bestimmtheitsmaß (R^2), die Wurzel des mittleren quadratischen Fehlers (RMSE) und die Fehlerquadratsumme (SSE) quantifiziert. Je höher die aufgeführten R^2 -Werte sind, desto höher ist die Erklärung der Varianz der Lufttemperaturzeitreihe durch das jeweilige LGR-Modell. Je kleiner die RMSE- und SSE-Werte sind, desto höher ist die Anpassungsgüte der verwendeten LGR-Modelle.

Tabelle 1: Zur Quantifizierung des klimawandelbedingten Lufttemperaturanstiegs im Zeitraum 1881-2022 in Baden-Württemberg verwendete lokal gewichtete Regressionsmodelle (LGR) mit Kernfunktion sowie Werte für das Bestimmtheitsmaß (R^2), die Wurzel des mittleren quadratischen Fehlers (RMSE) und der Fehlerquadratsumme (SSE).

ID	Modell, Kernfunktion	R^2	RMSE	SSE
1	LGR, Polynom 1. Grad, Trikubische Kernfunktion	0.46	0.60	50.9
2	LGR, Polynom 1. Grad, Rechteckskernfunktion	0.45	0.60	51.6
3	LGR, Polynom 1. Grad, Epanechnikov-Kernfunktion	0.48	0.59	49.2
4	LGR, Polynom 1. Grad, Biweight-Kernfunktion	0.46	0.60	51.1
5	LGR, Polynom 1. Grad, Triweight-Kernfunktion	0.47	0.60	50.2
6	LGR, Polynom 1. Grad, Kosinus- Kernfunktion	0.48	0.59	49.3
7	LGR, Polynom 1. Grad, Gauß-Kernfunktion	0.46	0.60	50.9
8	LGR, Polynom 1. Grad, Gauß-Kernfunktion modifiziert	0.46	0.60	50.9
9	LGR, Polynom 1. Grad, Trikubische Kernfunktion	0.46	0.60	51.2
10	LGR, Polynom 2. Grad, Rechteckskernfunktion	0.49	0.58	47.8
11	LGR, Polynom 2. Grad, Epanechnikov-Kernfunktion	0.46	0.60	51.2
12	LGR, Polynom 2. Grad, Biweight-Kernfunktion	0.51	0.57	45.9
13	LGR, Polynom 2. Grad, Triweight-Kernfunktion	0.48	0.59	48.5
14	LGR, Polynom 2. Grad, Kosinus- Kernfunktion	0.50	0.58	47.0
15	LGR, Polynom 2. Grad, Gauß-Kernfunktion	0.51	0.57	46.0
16	LGR, Polynom 2. Grad, Gauß-Kernfunktion modifiziert	0.49	0.58	47.8
17	Median aller LGR-Modelle	0.47	0.59	49.6
18	Mittelwert aller LGR-Modelle	0.48	0.59	48.9

Die Ergebnisse zur Anpassung der Polynome ersten Grades sind in der Abbildung 4a dargestellt. Alle acht aus der Anpassung resultierenden Kurven weisen einen ähnlichen Verlauf auf. Geringe, aber dennoch sichtbare Unterschiede sind vor allem zwischen 1945 und 1965 erkennbar. In diesem

¹¹ de Valk, Standard method for determining a climatological trend, 2020

¹² Jekabsons, LWP – Locally Weighted Polynomials toolbox for Matlab/Octave ver2.2., 2016

Zeitraum nimmt die klimawandelbedingte Lufttemperatur minimal ab. Der Mittelwert des klimawandelbedingten Lufttemperaturanstiegs, der sich aus diesen acht LGR-Modellen im Zeitraum 1881-2022 in Baden-Württemberg ergibt, beträgt 2,3 °C.

Etwas schwankender als die Kurven, die sich aus der Anpassung eines Polynoms ersten Grades ergeben, sind die Kurven, die aus der Anpassung der Polynome zweiten Grades hervorgehen (Abbildung 4b). Sie bilden mehrjährige Lufttemperaturschwankungen stärker nach, wodurch auch dekadische Lufttemperaturänderungen nachvollzogen werden können. Zwischen diesen acht Modellen gibt es stellenweise etwas größere Unterschiede als zwischen den acht Modellen, denen ein Polynom ersten Grades zugrunde liegt. Der Mittelwert des klimawandelbedingten Lufttemperaturanstiegs 1881-2022, der sich aus der Anpassung der zweiten acht LGR-Modelle ergibt, beträgt ebenfalls 2,3 °C.

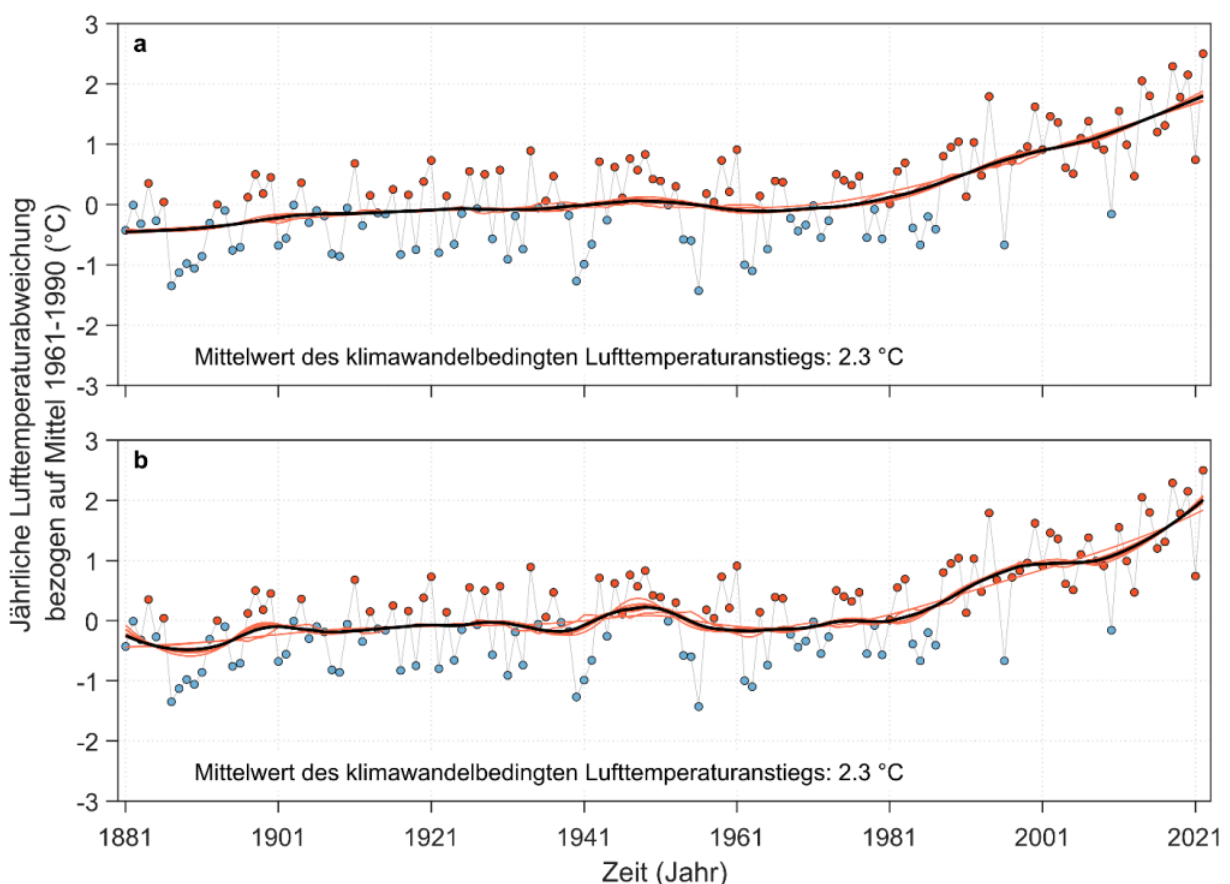


Abbildung 4: Lokal gewichtete Regressionen (LGR) auf der Grundlage von Polynomen (a) ersten und (b) zweiten Grades. Dünne, hellrote Linien kennzeichnen Polynomregressionen mit jeweils acht verschiedenen Kernfunktionen. Dickere, dunkelrote Linien kennzeichnen die daraus resultierenden Mittelwerte des klimawandelbedingten Lufttemperaturanstiegs im Zeitraum 1881-2022 in Baden-Württemberg.

Da die Anwendung der 16 LGR-Modelle zu ähnlichen Ergebnissen geführt hat, wurden alle Ergebnisse zu einem Ensemble zusammengefasst, für das die mittlere Kurve des klimawandelbedingten Lufttemperaturanstiegs berechnet wurde. Diese mittlere Kurve spiegelt den klimawandelbedingten Lufttemperaturanstieg im Zeitraum 1881-2022 in Baden-Württemberg wider (Abbildung 5). Neben dem hohen Änderungswert von +2,3 °C kommt die große Bedeutung des regionalen Klimawandels für den Lufttemperaturanstieg in Baden-Württemberg auch durch die hohe Varianzerklärung, die für alle in Tabelle 1 aufgeführten LGR-Modelle zwischen 45 und 50 % beträgt, zum Ausdruck.

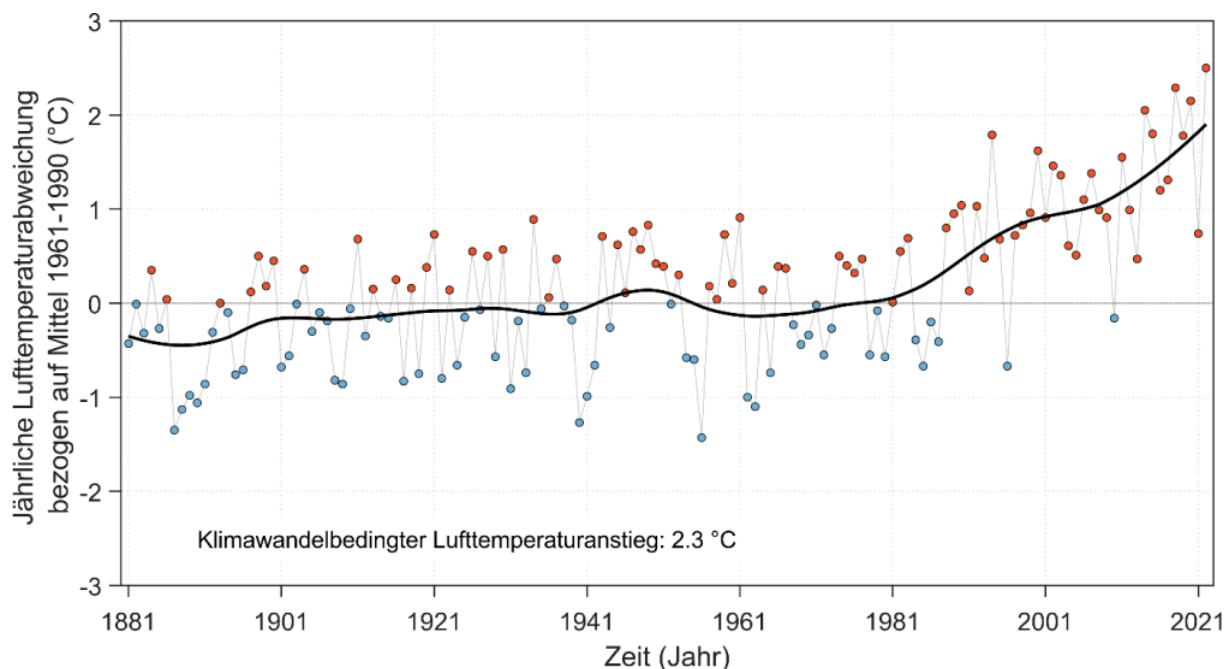


Abbildung 5: Klimawandelbedingter Lufttemperaturanstieg im Zeitraum 1881-2022 in Baden-Württemberg. Die schwarze Kurve, die den klimawandelbedingten Lufttemperaturanstieg widerspiegelt, resultiert aus der Mittelung von Ergebnissen, die mit einem Ensemble, das sich aus 16 lokal gewichteten Regressionsmodellen zusammensetzt, erzielt wurden.

V. Schlussfolgerungen

Vor dem Hintergrund des im Rahmen dieser Auswertung berechneten klimawandelbedingten Lufttemperaturanstiegs von 2,3 °C seit 1881 in Baden-Württemberg wird die Dringlichkeit einer zielorientierten, konsistenten und umfassenden Umsetzung von Klimaschutzmaßnahmen im Land offenkundig. Aufgrund des sich in den vergangenen Jahrzehnten beschleunigenden Lufttemperaturanstiegs ist zukünftig mit deutlich höheren Lufttemperaturwerten im gesamten Jahresverlauf zu rechnen. Beispielsweise werden höhere winterliche Lufttemperaturwerte die Entwicklung von Schneedecken einschränken. Im Frühjahr und Herbst ist mit einer Verlängerung der Vegetationsperiode zu rechnen und im Sommer mit deutlich mehr und intensiverer Hitzebelastung.

Zur Abschwächung des klimawandelbedingten Lufttemperaturanstiegs müssen alle Teile der Gesellschaft Baden-Württembergs an der Einhaltung der Klimaschutzziele, die für die kommenden Jahre im Teilbericht Sektorziele 2030 für Baden-Württemberg formuliert sind¹³, mitwirken. Gemeinsam mit einer stringenten Klimawandelanpassungsstrategie wird diese Mitwirkung vom Klima-Sachverständigenrat als die Grundvoraussetzung dafür gesehen, dass Baden-Württemberg auch für zukünftige Generationen als ein starker Wirtschaftsstandort und ein lebenswertes Land erhalten werden kann¹

¹³ Kelm et. al., Sektorziele 2030 und klimaneutrales Baden-Württemberg 2040. Teilbericht Sektorziele 2030, 2022

¹ Schmidt et al., Zum Entwurf des Klimaschutz- und Klimawandelanpassungsgesetzes (KlimaG). Stellungnahme des Klimasachverständigenrats, 2022

VI. Literaturverzeichnis

1. Schmidt, M., Schindler, D., Arneht, A., Kesselring, S., Löbbe, S., Pehnt, M., Hack, A., Jung, C., Laimer, T., Liebhart, L., Ortner, S., Seibt, K., 2022: Zum Entwurf des Klimaschutz- und Klimawandelanpassungsgesetzes (KlimaG). Stellungnahme des Klimasachverständigenrats. Verfügbar online: https://um.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/m-um/intern/Dateien/Dokumente/4_Klima/Klimaschutz/Klima-Sachverstaendigenrat/Stellungnahme-Klima-Sachverstaendigenrat-Entwurf-KlimaG-barrierefrei.pdf
2. IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2021: Summary for Policymakers. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfeld, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Verfügbar online: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/chapter/summary-for-policymakers/> (Zugriff am 27.01.2023)
3. C3S (Copernicus Climate Change Service), 2023: Globe in 2022. Key messages. Verfügbar online: <https://climate.copernicus.eu/globe-2022> (Zugriff am 27.01.2023)
4. Ciais, P., Sabine, G., Bala, L., Bopp, V., Brovkin, J., Canadell, A., Chhabra, R., DeFries, J., Galloway, M., Heimann, C., Jones, C., Le Quéré, R.B., Myneni, S., Piao and P. Thornton, 2013: Carbon and Other Biogeochemical Cycles. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. Verfügbar online: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WG1AR5_Chapter06_FINAL.pdf (Zugriff am 27.01.2023)
5. C3S (Copernicus Climate Change Service), 2023: Climate Key Indicators: Temperature. Verfügbar online: <https://climate.copernicus.eu/climate-indicators/temperature> (Zugriff am 27.01.2023)
6. WMO (World Meteorological Organization), 2022: State of the Climate in Europe 2021. Verfügbar online: https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=11378 (Zugriff am 27.01.2023)
7. DWD-CDC (*Climate Data Center* des Deutschen Wetterdienstes), 2023: Jährliche Gebietsmittel der Lufttemperatur (Jahresmittel) in °C (2 m Höhe). Verfügbar online: https://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/regional_averages_DE/annual/air_temperature_mean/regional_averages_tm_year.txt (Zugriff am 27.01.2023)
8. WMO (World Meteorological Organization), 2017: WMO Guidelines on the Calculation of Climate Normals. Verfügbar online: https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=4166 (Zugriff am 27.01.2023)
9. Kaspar, F., Imbery, F., Friedrich, K., 2021: Nutzung klimatologischer Referenzperioden ab 2021. Verfügbar online: https://www.dwd.de/DE/leistungen/besondereereignisse/verschiedenes/20210119_neue_referenzperiode.pdf?__blob=publicationFile&v=6 (Zugriff am 27.01.2023)
10. LUBW (Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg), 2023: Wieder ein Rekordjahr – So sonnig und warm wie noch nie. Verfügbar online: <https://pudi.lubw.de/detailseite/-/publication/10485> (Zugriff am 10.03.2023)
11. de Valk, C.F., 2020: Standard method for determining a climatological trend. Royal Netherlands Meteorological Institute, Technical Report, TR-389. Verfügbar online: https://cdn.knmi.nl/system/ckeditor_assets/attachments/161/TR389.pdf (Zugriff am 27.01.2023)
12. Jekabsons, G., 2016: LWP – Locally Weighted Polynomials toolbox for Matlab/Octave ver2.2. Verfügbar online: <http://www.cs.rtu.lv/jekabsons/regression.html> (Zugriff am 27.01.2023)

-
13. Kelm, T., Bergk, F., Bickel, P., Bürger, V., Fehrenbach, H., Fleiter, T., Hennenberg, K., Jachmann, H., Liebhart, L., Manz, P., Mellwig, P., Neuwirth, M., Sandrock, M., Stange, H., Wiegmann, K., 2022: Sektorziele 2030 und klimaneutrales Baden-Württemberg 2040. Teilbericht Sektorziele 2030. Verfügbar online: https://www.zsw-bw.de/fileadmin/user_upload/PDFs/Pressemitteilungen/2022/220624_Teilbericht_Sektorziele_BW.pdf