



Klimawandel und Extremereignisse: Temperatur inklusive Hitzewellen

*Karsten Friedrich, Thomas Deutschländer, Frank Kreienkamp, Nora Leps,
Hermann Mächel und Andreas Walter*

Inhaltsverzeichnis

- 6.1 Beobachtete Temperaturänderungen – 62**
 - 6.1.1 Klimatologische Kenntage und Häufigkeitsverteilung – 62
 - 6.1.2 Hitzewellen – 64
- 6.2 Zukunftsprojektionen – 65**
 - 6.2.1 Klimatologische Kenntage – 67
 - 6.2.2 Wärmeperioden – 69
 - 6.2.3 Regionale Datensätze auf der Basis von CMIP6 – 70
- 6.3 Kurz gesagt – 70**
 - Literatur – 70**

Neben den im Zuge der globalen Erwärmung erwarteten Änderungen der Mitteltemperaturen in Deutschland sind es insbesondere die Temperatur-extreme, die unser Leben prägen. Es wird davon ausgegangen, dass es nicht nur zu einer allgemeinen Verschiebung der Temperaturverteilung hin zu höheren Werten kommen wird, sondern auch zu einer Zunahme der Klimavariabilität (Fischer und Schär 2008). Hieraus ergibt sich die Frage, inwieweit es auch zu neuen, in einer bestimmten Region bislang noch nicht beobachteten Rekordwerten kommen könnte. Die Hitzewellen der Jahre 2018 und 2019 zeigen sowohl für Deutschland als auch den europäischen Raum, dass neue Temperaturrekorde vermehrt auftreten. Attributionsanalysen (► Kap. 28), wie die für Hitzewellen im Juni und Juli 2019 (Vautard et al. 2020), bestätigen den anthropogenen Klimawandel als Ursache. Der Klimawandel hat sowohl die Wahrscheinlichkeit als auch die Intensität von Hitzewellen erhöht.

Die Mehrzahl der wissenschaftlichen Untersuchungen beschäftigt sich vorwiegend oder gar ausschließlich mit den Veränderungen am warmen Ende der Temperaturverteilung, da dort ein höheres Schadenspotenzial zu erwarten ist. Hier spielen oft medizinische Implikationen eine wesentliche Rolle, wie der Sommer 2003 mit einer deutlich erhöhten Sterblichkeitsrate infolge der beiden Hitzewellen im Juni und insbesondere im August im westlichen und zentralen Europa deutlich gezeigt hat (z. B. Koppe et al. 2003; Robine et al. 2008). Auch die Veränderungen bei den kalten Werten sind von sozioökonomischer Bedeutung, wurden aber nur vereinzelt untersucht (Auer et al. 2005; Matulla et al. 2016).

Die Aussagen für die Zukunft werden dabei von den Ergebnissen einer Reihe europäischer Forschungsprojekte gestützt, in deren Rahmen gezielt Ensembles regionaler Klimaprojektionen erstellt und kollektiv für den Kontinent ausgewertet (Jacob et al. 2014, 2020; Matulla et al. 2014; Hübener et al. 2017). Untersuchungsgrößen sind dabei häufig die sogenannten Kenn- oder Ereignistage (s. Box in 6.2.3). Teilweise werden die zu über- oder unterschreitenden Schwellenwerte aber auch mittels statistischer Quantile bestimmt. Hierbei werden bevorzugt moderate Schwellen wie z. B. das 10. oder 90. Perzentil betrachtet, was den 10 % der niedrigsten bzw. höchsten Werte der vorliegenden Daten oder jeweils 36 Werten pro Jahr entspricht. Durch diese Vorgehensweise werden zwar nicht nur die stärksten Extreme und somit die besonders impaktrelevanten Ereignisse, sondern die 10 % der höchsten oder niedrigsten Werte insgesamt in die Analyse einbezogen. Dafür nimmt aber die Verlässlichkeit der Ergebnisse zu.

Über die Untersuchungen auf Tagesbasis hinaus wurde auch das Verhalten von länger andauernden Ereignissen bereits ausgewertet – insbesondere Hitzewellen. Eine absolut einheitliche Definition gibt es dabei

zwar nicht, die unterschiedlichen Ergebnisse sind jedoch trotzdem gut miteinander vergleichbar. In Einzelfällen wurden auch aggregierte Werte vordefinierter Länge wie Monats- oder Jahreszeitenwerte betrachtet.

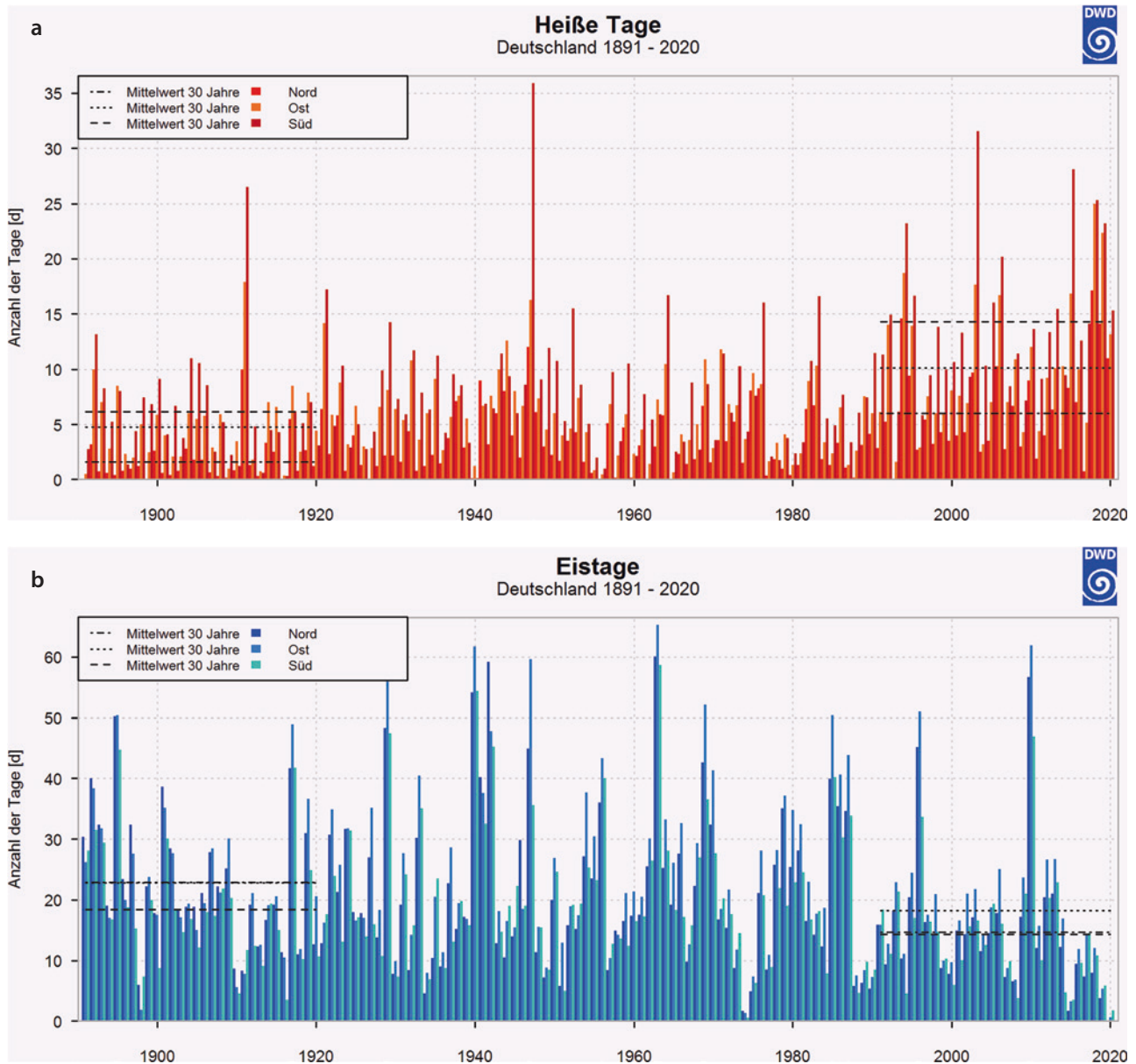
6.1 Beobachtete Temperaturänderungen

In den letzten drei Jahrzehnten wurden zahlreiche Studien zu dem seit der Industrialisierung zu beobachtenden Temperaturanstieg und den damit verbundenen Änderungen extremer Temperaturereignisse – global und für Europa – publiziert. Zusammenfassungen dieser Ergebnisse finden sich in den Sonderberichten des IPCC (IPCC 2012, 2019) und dem Fünften Sachstandsberichts des IPCC (Hartmann et al. 2013). Der Beitrag der Arbeitsgruppe „Naturwissenschaftliche Grundlagen des Klimawandels“ für den Sechsten Sachstandsbericht des IPCC wurde im August 2021 veröffentlicht (IPCC 2021). Diese Studien zeigen die generelle Tendenz zur Verschiebung der Tagesmitteltemperatur in Richtung hoher Quantilwerte und eine höhere Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von extrem heißen Tagen. Es gilt als sicher, dass die Anzahl der warmen Tage und Nächte angestiegen und die Anzahl der kalten Tage und Nächte in Europa seit den 1950er-Jahren zurückgegangen ist. Als ebenso gesichert gilt, dass in den meisten Regionen Europas in den letzten Dekaden überproportional viele Hitzewellen (s. Box „Klimatologische Kenngrößen“ in ► Abschn. 6.2.3) aufgetreten sind (Hartmann, et al. 2013). Die Häufigkeit und die Intensität einiger extremer Wetter- und Klimaereignisse (z. B. Anzahl von heißen Tagen, Dauer und Intensität von Hitzewellen) haben als Folge der globalen Klimaerwärmung zugenommen und werden bei mittleren und hohen Emissionsszenarien weiter steigen (IPCC 2019, 2021).

Für die statistische Auswertung stationsbezogener Messungen in Europa stehen neben den Daten der nationalen Wetterdienste auch europaweite und globale Datensammlungen zur Verfügung. Eine der am häufigsten verwendeten ist die des *European Climate Assessment & Dataset* (ECA&D) mit einer Auswahl an europäischen Stationen mit Tageswerten verschiedener meteorologischer Messgrößen (Klok und Klein Tank 2009; ► Kap. 3).

6.1.1 Klimatologische Kenntage und Häufigkeitsverteilung

Zur Ableitung klimatologischer Kenntage wird, ausgehend von beobachteten Temperaturen, beispielsweise die Anzahl der Über- bzw. Unterschreitungen festgesetzter Schwellenwerte bestimmt (s. Box ► Abschn. 6.2.1). ■ Abb. 6.1 zeigt Zeitreihen für zwei



■ **Abb. 6.1** Zeitreihe der jährlichen Anzahl an **a** heißen Tagen und **b** Eistagen für den Zeitraum 1891–2020 für Nord-, Ost- und Süddeutschland (Mittel jeweils über 14, 13 und 15 Stationen). (Deutscher Wetterdienst)

Kenntage an ausgewählten Stationen für den Zeitraum zwischen 1891 und 2020. Dabei werden heiße Tage und Eistage an 42 deutschen Stationen betrachtet. Eine Berechnung der Kenntage für ganz Deutschland ist aufgrund der Datenlage erst ab 1951 möglich. Die Abbildung stellt die Zeitreihen der Anzahl von Hitze- und Eistagen pro Jahr für die drei Subregionen Nord-, Ost- und Süddeutschland als Mittel über 14, 13 und 15 Stationen dar. Erkennbar ist, dass heiße Tage häufiger in Süddeutschland auftreten als in Ost- und Norddeutschland, während in Ostdeutschland die höchsten Zahlen an Eistagen registriert werden. Ferner ist ersichtlich, dass die von Jahr zu Jahr stark variierende Anzahl

der Hitze- und Eistage von dekadischen Schwankungen überlagert ist. Dies gilt ebenso für die weniger extremen Sommer- und Frosttage (nicht dargestellt). Trotz der starken Schwankungen ist anhand der vieljährigen Mittelwerte zu Beginn und am Ende des Beobachtungszeitraumes zu erkennen, dass sich bei den heißen Tagen eine deutliche Zunahme ergibt, während es bei den Eistagen zu einer Abnahme kommt. Die Zunahme der heißen Tage beträgt im Ost und Süden mehr als das Doppelte, im Norden sogar mehr als das Dreifache. Die Abnahme der Eistage bewegt sich im Bereich von 20 bis 35 %. Der Trend der Abnahme ist im Osten und Süden nicht signifikant. Die Anzahl der hei-

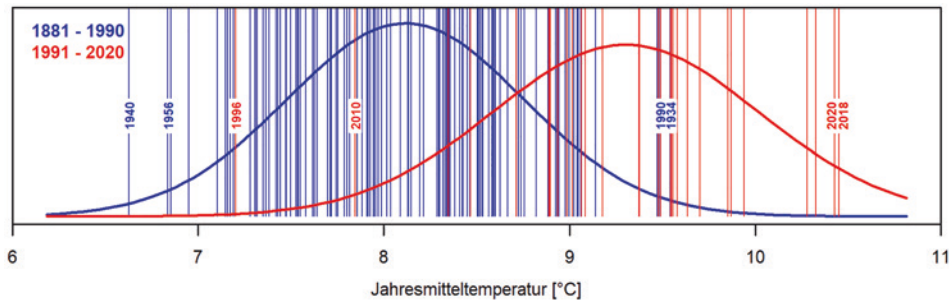


Abb. 6.2 Häufigkeitsverteilungen der Jahresmitteltemperaturen für Deutschland für den Zeitraum 1881–1990 und 1991–2020. (Deutscher Wetterdienst)

6

ßen Tage in Süddeutschland im Jahr 1947 wurde bisher noch nicht wieder erreicht. Die Häufung von Jahren mit einer sehr hohen Anzahl von heißen Tagen in den letzten drei Dekaden wird jedoch deutlich.

Imbery et al. (2021) zeigen die Häufigkeitsverteilung der Jahresmitteltemperatur der letzten 30 Jahre im Vergleich zum Zeitraum zwischen 1881 und 1990 (Abb. 6.2). Die Verschiebung der mittleren Jahrestemperaturen (Scheitelpunkt der Kurven) um über 1 °C ist deutlich zu erkennen. Die in dem früheren Zeitraum wärmsten Jahre liegen im aktuellen Zeitraum im Bereich des Durchschnitts. Diese Verschiebung kann auch bei den Extremtemperaturen beobachtet werden und macht das Auftreten von heißen Tagen wahrscheinlicher.

6.1.2 Hitzewellen

Bei der Betrachtung von Hitzewellen gibt es mittlerweile ein breites Portfolio an Herangehensweisen. Oft werden feste Temperaturschwellenwerte für die Maximumtemperatur verwendet. Aber auch die Abkühlung in den Nachtstunden hat einen hohen Einfluss auf die Belastung durch Hitze für den menschlichen Körper. Deshalb wird die Minimumtemperatur bei bestimmten Analysen einbezogen. Um Auswertungen in unterschiedlichen Regionen durchführen zu können, werden Perzentile der lokalen Temperaturmaxima und -minima verwendet. Auch die Andauer und die räumliche Ausdehnung von Hitzewellen wird unterschiedlich definiert. In Abb. 6.3 wurde für jedes Jahr für acht deutsche Städte die wärmste 14-tägige Periode mit einem mittleren Tagesmaximum von mindestens 30 °C ausgewählt. Die Datenlage lässt hier eine Auswertung ab 1951 zu. Für einzelne Stationen lassen sich aber auch über diesen Zeitraum hinaus Aussagen machen. So wurde an der Station Hamburg im Jahr 1994 das erste Mal die 30 °C-Marke beim 14-tägigen Mittelwert seit Beobachtungsbeginn im Jahr 1936 überschritten.

Markante Hitzewellen seit 1951

14-tägige Hitzeperioden mit einem mittleren Tagesmaximum der Lufttemperatur von mindestens 30,0 °C für ausgewählte deutsche Großstädte

- mittleres Tagesmaximum der jeweiligen Hitzewelle
- größtes mittleres Tagesmaximum bei einer Hitzewelle

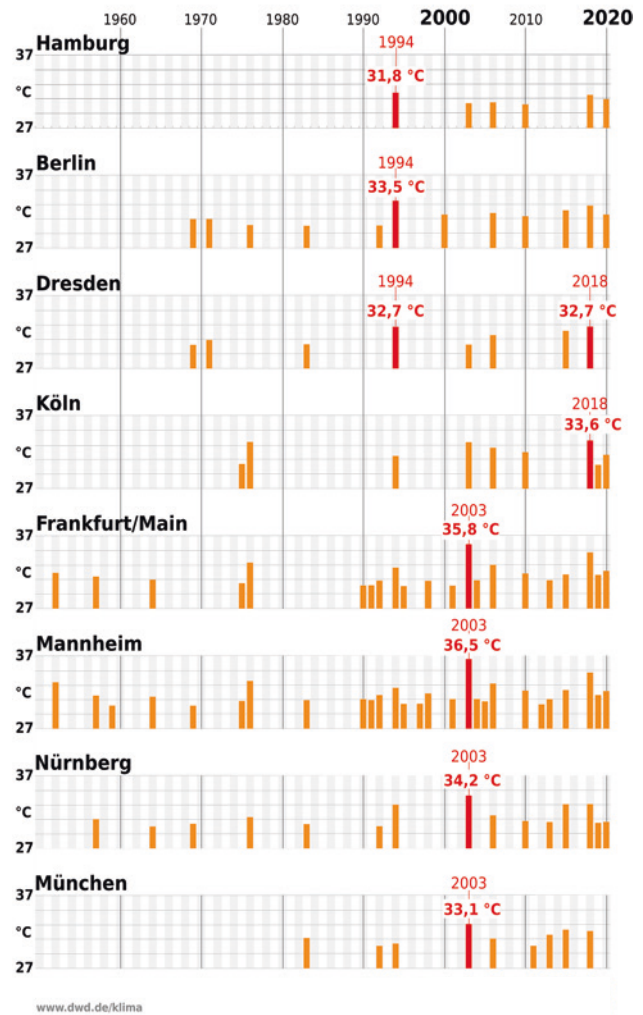


Abb. 6.3 Maximale jährliche 14-tägige Hitzewellen mit einem mittleren Tagesmaximum von 30 °C oder mehr für acht deutsche Großstädte. (Deutscher Wetterdienst)

Die Station Mannheim verzeichnet für das Jahr 1947, indem die bisherige höchste Anzahl von heißen Tagen für Süddeutschland (■ Abb. 6.1 a) beobachtet wurde, einen Mittelwert der Maximumtemperatur von 32,2 °C und liegt damit unter dem im Jahr 2003 registrierten Wert von 36,5 °C. Trotz der in den letzten Jahren beobachteten neuen Temperaturrekorde für Deutschland war die Hitzewelle 2003 in Bezug auf die Höhe der gemessenen Temperaturen und der Andauer der Hitze weiterhin herausragend. Der Schwerpunkt der Hitzewelle lag über dem südlichen Mitteleuropa und beeinflusste besonders den Südwesten Deutschlands. Im Jahr 2015 erreichte die Station Kitzingen am 5. Juli mit 40,3 °C einen neuen Temperaturrekord, der am 7. August erneut eingestellt wurde (Becker et al. 2015). Dieser Rekord wurde im Jahr 2019 deutlich übertroffen. Am 25. Juli kletterte das Thermometer an den Stationen Tönisvorst und Duisburg-Baerl auf eine Temperatur von 41,2 °C (DWD 2020). Eine Maximumtemperatur von mehr als 40 °C zeigte das Thermometer an verschiedenen Stationen an drei aufeinanderfolgenden Tagen zwischen dem 24. und 26. Juli (Bissolli et al. 2019). Bisher wurden hierzulande Werte von 40 °C und mehr nur an einzelnen Tagen und räumlich sehr eng begrenzt registriert. Auch wenn in dieser Phase die Hitzebelastung sehr hoch war, beschränkte sich die Andauer in dieser Höhe auf wenige Tage. Auch in den anderen Jahren seit 2003 kam es zu einer Unterbrechung der sehr heißen Phasen durch kühlere Temperaturen. Im Jahr 2018 sorgte eine Hitzewelle von Mitte Juli bis Mitte August für sehr hohe Temperaturen (Imbery et al. 2018). In dieser Zeit wurden die bisherigen Rekorde der 14-tägigen Mittelwerte für die Stationen Dresden und Köln überschritten (■ Abb. 6.3). Neben den hohen Temperaturen im Sommer war der Zeitraum zwischen März und November 2018 von extremer Trockenheit gekennzeichnet. Zscheischler und Fischer (2020) schätzten das Auftreten der sehr hohen Temperaturen und der sehr geringen Niederschläge auf höchstens alle paar hundert Jahre.

Die Hitzewelle im Jahr 2018 war verbunden mit einer lang andauernden Trockenheit in vielen Regionen. Diese Kombination wird in der englischsprachigen Literatur *compound event* genannt. Hier ist ein Anstieg des Auftretens solcher Ereignisse zu erwarten (Manning et al. 2019; IPCC 2021).

Die Hitzewelle über Mitteleuropa im Juli 2019 wurde in einer Attributionsstudie untersucht (Vautard et al. 2020). In einer solchen Studie wird die Auftrittswahrscheinlichkeit von Ereignissen und der eventuelle Zusammenhang mit dem anthropogenen Klimawandel bestimmt (► Kap. 28). Demnach ergibt sich für Deutschland eine Häufigkeit des Auftretens einer solchen dreitägigen Hitzewelle einmal innerhalb von 10

bis 30 Jahren. Des Weiteren stieg durch den Klimawandel die Wahrscheinlichkeit solcher Hitzewellen um mindestens das Dreifache. Die Maximumtemperaturen wären ohne Klimawandel etwa 1,5 bis 3 °C niedriger gewesen.

Die Hitzewellen in den Jahren 2003, 2006, 2015 und 2018 sind nach Kornhuber et al. (2019) verbunden mit einem bestimmten Zirkulationsmuster der Rossby-Wellen (großräumige Wellenbewegungen in der Erdatmosphäre¹). Auch Mann (2019) hat die Ursachen für langanhaltende stabile Witterungsphasen untersucht. Durch die starke Erwärmung der Arktis, für die vor allem die geringe Meereisbedeckung verantwortlich ist, ergibt sich eine Verringerung des Temperaturgradienten zwischen dem Äquator und dem Pol. Aktuell gibt es in der Wissenschaft die These, dass es dadurch zu einer Verlangsamung des Jet-Streams, des Windbands in ungefähr 10 km Höhe, kommt und die Amplitude der Rossby-Wellen größer wird. In den Wellenbergen und -tälern setzen sich Hoch- und Tiefdruckgebiete mit langen Verweilzeiten fest. Somit werden längere heiße und trockene oder kühle und feuchte Witterungsphasen wahrscheinlicher (Kornhuber et al. 2020).

6.2 Zukunftsprojektionen

Wie im ► Kap. 2 beschrieben, basieren Analysen des zukünftigen Klimas auf definierten Szenarien, die unterschiedliche Zukunftspfade beschreiben. Für die nachfolgenden Aussagen wird auf Datensätze zurückgegriffen, die den RCP-Szenarien (Moss et al. 2010; van Vuuren et al. 2011a) folgen. Der Schwerpunkt wird dabei auf die Szenarien RCP2.6 (van Vuuren et al. 2011b) und RCP8.5 (Riahi et al. 2011) gelegt. Im weiteren Text wird das Szenario RCP2.6 als **Klimaschutzszenario** und das Szenario RCP8.5 als **Hochemissions-szenario** bezeichnet. Diese Szenarien wurden im Rahmen des CMIP5-Projektes (Taylor et al. 2012) für eine Vielzahl an Projektionen mit unterschiedlichen globalen Klimamodellen (GCMs) als Randbedingungen verwendet. Die Untersetzung der grob aufgelösten GCM-Rechnungen erfolgte im Rahmen der Projekte EURO-CORDEX (Jacob, et al. 2014, 2020; Ciarlo et al. 2021) und ReKliEs-De (Hübener, et al. 2017). Mehr zu regionalen Klimamodellen ist im ► Kap. 4 zu finden. Da bisher nur wenige regionale Datensätze auf der Basis des Teilprojektes ScenarioMIP (O'Neill et al. 2016) vom CMIP6-Projekt (Eyring et al. 2016) verfügbar sind, erfolgt hier nur ein kurzer Ausblick.

Die für die nachfolgenden Auswertungen genutzten regionalen Datensätze wurden vor der Nutzung auf

1 ► https://www.dwd.de/DE/wetter/thema_des_tages/2015/11/24.html

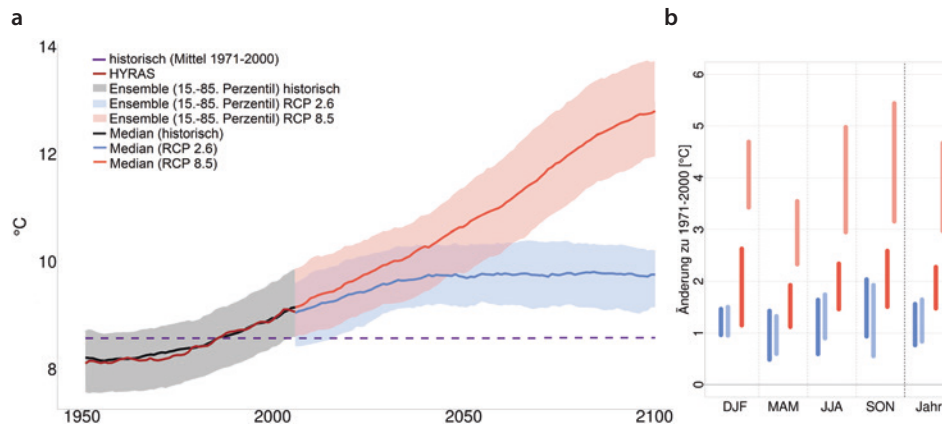


Abb. 6.4 Änderung der mittleren jährlichen Lufttemperatur über Deutschland als Zeitreihe (1951–2100; **a** 30-jähriges gleitendes Mittel und **b** als Änderungssignale für die nahe (dunkler Farbton) und die ferne Zukunft (heller Farbton) im Vergleich zum Bezugszeitraum. Die Zeitreihendarstellung erfolgt für Beobachtungsdaten (HYRAS) und zwei der DWD-Referenzensembles (für die Szenarien Klimaschutzszenario RCP2.6 und Hochemissionsszenario RCP8.5). Die violett gestrichelte Linie zeigt den Mittelwert aus den historischen Modellläufen für den Bezugszeitraum. Die Änderungssignale (Ensemblemedian als schwarzer Punkt sowie die Bandbreite als dicke Linie) werden für die Jahreszeiten (Winter/DJF, Frühling/MAM, Sommer/JJA, Herbst/SON) und das Jahr für das Klimaschutzszenario (blau) und das Hochemissionsszenario (rot) dargestellt

Unstimmigkeiten (Zier et al. 2020) und kritische Annahmen (z. B. stationäre Treibhausgase, Jerez et al. 2018) geprüft. Auf der Basis dieser Erkenntnisse wurde der vorhandene Datensatz reduziert².

Alle nachfolgenden Aussagen geben eine Änderung gegenüber dem Bezugszeitraum zwischen 1971 und 2000 an. Die Nutzung des Zeitraumes widerspricht zwar den WMO-Vorgaben (World Meteorological Organization 2017), nach denen der Zeitraum 1961 bis 1990 als Referenz für den Klimawandel zu nutzen ist. Da aber eine Vielzahl der Datensätze erst Daten ab 1970 umfasst, war eine WMO-konforme Auswertung nicht möglich. Beschrieben werden zwei Zeitfenster: 2031 bis 2060 für die Mitte des Jahrhunderts/**nahe Zukunft** und 2071 bis 2100 für das Ende des Jahrhunderts/**ferne Zukunft**. Details dazu sind in Hänzel et al. (2020) zu finden. Für einige Aspekte wurde die Abschätzung der Änderung von Extremen mit der Kernschätzmethode durchgeführt (Dalelane und Deutschländer 2013).

Wie **Abb. 6.4** zeigt, geben die Ergebnisse der genutzten Ensembles für jedes Szenario eine Bandbreite an möglichen Klimaänderungen wieder. Um diese mit abzubilden, wird neben der Information der mittleren Änderung auch das 15. und 85. Perzentil der Modellergebnisse mit benannt. Die Daten decken somit 70 % der Bandbreite ab.

Je nach gewähltem Szenariengang wird sich die globale Temperatur bis zum Ende des 21. Jahrhunderts gegenüber der vorindustriellen Zeit (1850–1900) um

knapp unter 2 °C (Klimaschutzszenario) bzw. 3,2 bis 5,4 °C (Hochemissionsszenario) erhöhen (IPCC 2014). Das Paris-Ziel einer Welt mit weniger als 1,5 °C Erwärmung ist mit beiden Szenariengängen nicht erreichbar. Die Erwärmung über Land übertrifft dabei die globale Erwärmungsrate (IPCC 2014, 2021). Werden diese globalen Datensätze auf die regionale Skala herunterskaliert, bleibt die Bandbreite erhalten. Analysen zeigen, dass die Lage der aufgezeigten Bandbreite einer einzelnen Projektion im Szenarienzentrum im Wesentlichen vom globalen Klimamodell abhängt. Der Einfluss des regionalen Klimamodells ist gering (Hübener et al. 2017).

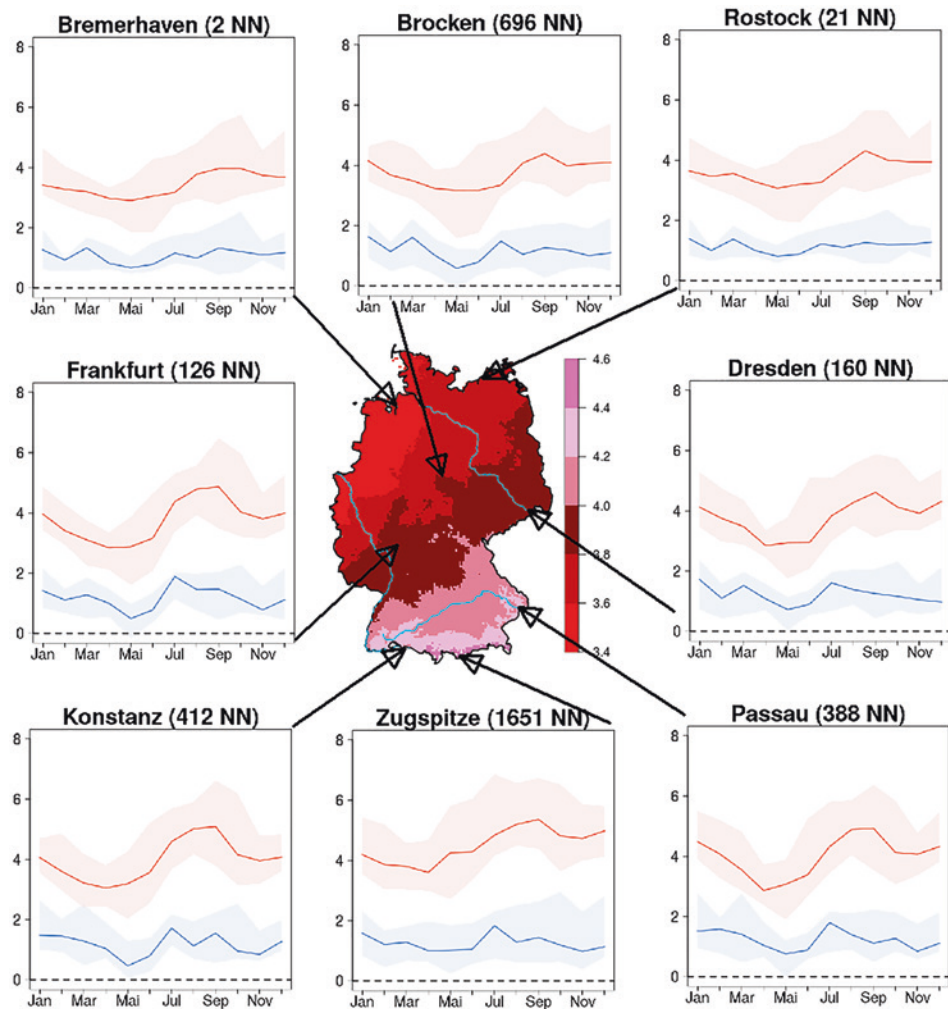
Die Projektionen zeigen für sämtliche Jahreszeiten, Regionen und Emissionsszenarien steigende Temperaturen. Der stärkste Temperaturanstieg wird zum Ende des 21. Jahrhunderts für das Hochemissionsszenario projiziert. Für dieses Szenario liegt der mittlere Temperaturanstieg des Modellensembles – je nach Region und Jahreszeit – zwischen 3,0 °C und 4,2 °C. Der untere Bereich des Ensembles (15. Perzentil) reicht von 1,9 °C bis 3,3 °C, der obere Bereich (85. Perzentil) liegt zwischen 3,2 °C und 6,1 °C (s. **Abb. 6.4**).

Für die nahe Zukunft hat das gewählte Szenario einen geringen Einfluss auf die Temperaturänderung. Die Bandbreite der Szenarien weist einen ähnlichen Wertebereich auf. In der fernen Zukunft liegen die Projektionen der beiden Szenarien deutlich auseinander. Abhängig von Region und Jahreszeit liegen die mittleren Änderungswerte um bis zu 3,3 °C höher.

Beim Klimaschutzszenario liegt das Temperaturniveau in der fernen Zukunft auf vergleichbarem Niveau wie in der nahen Zukunft. Beim Hochemissionsszenario ergibt sich ein Anstieg der Tem-

² Dieser reduzierte Datensatz (DWD-Referenz-Ensembles v2018) ist unter www.dwd.de/ref-ensemble beschrieben.

■ **Abb. 6.5** Median der mittleren Temperaturänderung [°C] für das Hochemissionsszenario (Mitte) aus dem DWD-Referenzensemble und den Zeitraum 2071–2100 gegenüber dem Bezugszeitraum 1971–2000. Umliegende Grafiken zeigen den mittleren Jahresgang der Temperaturänderung [°C] für das Klimaschutzszenario (RCP 2.6) und Hochemissionsszenario (RCP 8.5) im Zeitraum 2071–2100. Linien repräsentieren die Änderung des Ensemblemedians, schattierte Bereiche zeigen die Modellunsicherheit (15. bis 85. Perzentil). Die Ergebnisse basieren jeweils auf dem Mittelwert der nächsten 3 × 3-Gitterzellen des Standorts



peratur um ca. 4 °C gegenüber dem Bezugszeitraum. Dabei ist ein Gradient von Nord nach Süd sichtbar (s. Abb. 6.5). Beispielhaft werden für acht Orte Jahresgänge der Änderungssignale gezeigt. Diese Diagramme zeigen einen prägnanten Jahresgang.

6.2.1 Klimatologische Kenntage

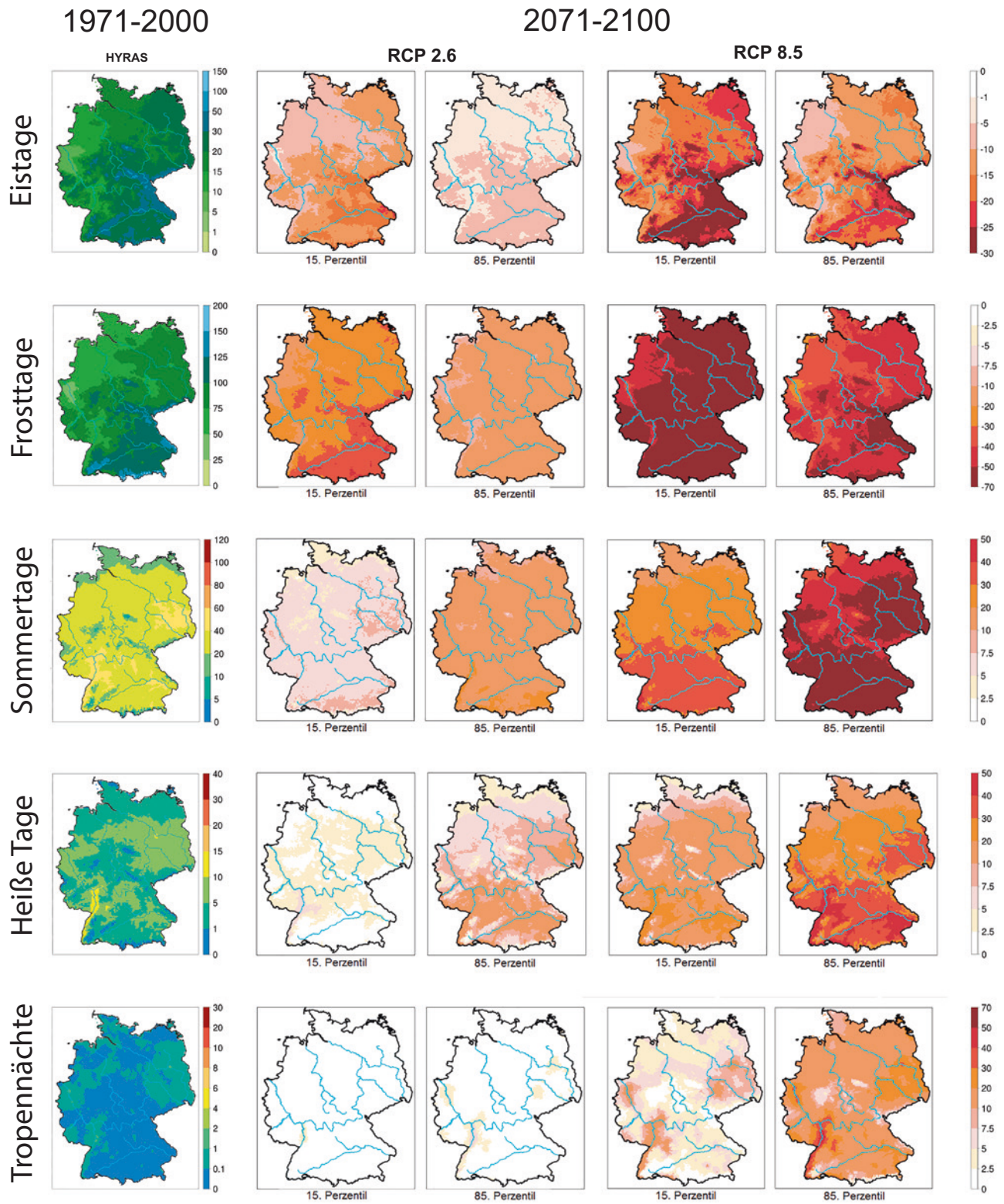
Im Folgenden wird die projizierte Veränderung der schwellwertbasierten Indizes für Deutschland für das 21. Jahrhundert in Form von Gebietsmitteln und als räumliche Muster von Änderungswerten für die zwei Szenarien dargestellt. Für die Definitionen der Kenntage, s. Box „Klimatologische Kenngrößen“.

Die Analyse der klimatologischen Kenntage zeigt deutlich, dass auch in Deutschland zukünftig mit einer wesentlich höheren Anzahl warmer Temperaturextreme zu rechnen ist. Damit verbunden wird der Hitzestress deutlich steigen (Coffel et al. 2017; Casanueva et al. 2020). Bei den kalten Kenntagen beschränken sich die Untersuchungen zumeist auf die Analyse der Frosttage

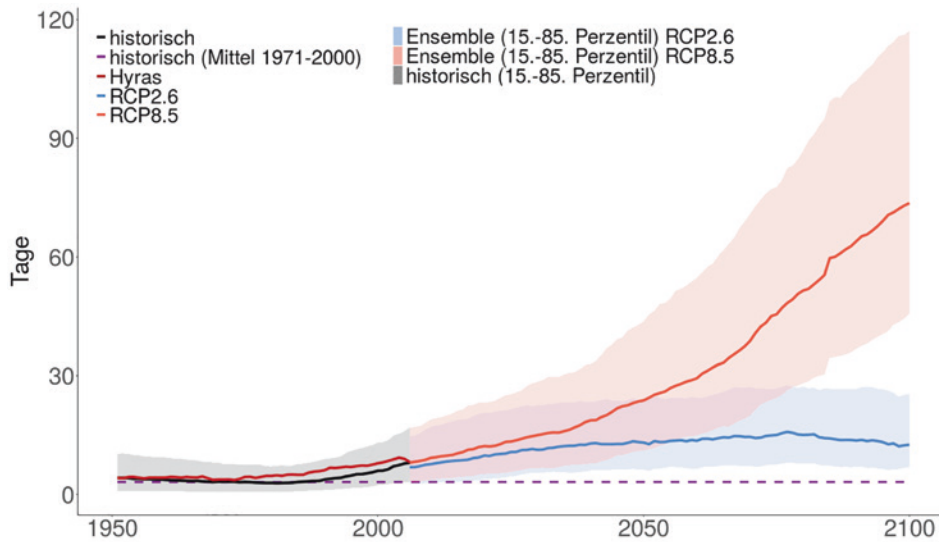
und Eistage, deren Anzahl merklich zurückgehen wird (■ Abb. 6.6). Erwartungsgemäß gilt das insbesondere für das Hochemissionsszenario sowie die ferne Zukunft.

Infolge des Klimawandels werden etliche Regionen deutlich häufiger betroffen sein als bisher. Entsprechend des Hochemissionsszenario in der fernen Zukunft würde die Anzahl der heißen Tage im Deutschlandmittel um +28 Tage ansteigen, in weiten Teilen Deutschlands sind über 40 heiße Tage pro Jahr zu erwarten. In Zukunft werden Sommertage besonders in tiefen Lagen deutlich öfter auftreten. Das Hochemissionsszenario projiziert für die ferne Zukunft deutlich über 100 Sommertage pro Jahr. Dies entspricht einem Zuwachs von rund 50 Tagen pro Jahr. Auch in den Mittelgebirgslagen und den Alpen unterhalb rund 2000 m ü. NN werden Sommertage häufig auftreten (rund 20 Tage pro Jahr). Dem Hochemissionsszenario zufolge werden zukünftig auch im Frühjahr bzw. im Herbst deutlich mehr Sommertage sowie heiße Tage auftreten.

Aufgrund des starken Anstiegs von heißen Tagen und Tropennächten steigt auch die Häufigkeit von län-



■ **Abb. 6.6** Klimatologische Kenntage in Anzahl Tagen pro Jahr. Gezeigt sind Eistage, Frosttage, Sommertage, heiße Tage sowie Tropennächte (Definitionen ► Abschn. 6.2.1). Die linke Spalte stellt die mittlere Anzahl Tage pro Jahr im Bezugszeitraum dar. Die vier rechten Spalten zeigen die projizierte Änderung in Anzahl der Tage für den Zeitraum bis Ende des Jahrhunderts, jeweils 15. und 85. Perzentil des Klimaschutzenszenarios (RCP2.6) und Hochemissionsszenario (RCP8.5)



■ **Abb. 6.7** Entwicklung des *warm spell duration index* auf Grundlage der Beobachtungsdaten (HYRAS, dunkelrote Linie) und des Klimaschutzszenarios (RCP2.6, blaue Linie) und Hochemissionsszenario (RCP8.5, rote Linie). Gezeigt werden die Medianwerte (Linie) und die Bandbreite (Farbereich um die jeweilige Linie) auf der Basis des 15. und 85. Perzentils. Die gestrichelte violette Linie zeigt das Mittel des Zeitraumes 1971–2000 aus dem historischen Zeitraum der Klimamodelldaten

geren Wärme- und Hitzeperioden an. Während solche Phasen im Beobachtungszeitraum kaum auftraten, ist unter Annahme des Hochemissionsszenario in der nahen Zukunft im Deutschlandmittel bereits alle 5 bis 21 Jahre mit einem solchen Ereignis zu rechnen; in der fernen Zukunft wird im Mittel jedes Jahr ein solches Ereignis erwartet. Dabei ist zu beachten, dass sich Wärmeperioden im Gegensatz zu Hitzewellen nicht nur auf die warmen Monate beschränken, sondern – aufgrund ihrer Definition – in allen Jahreszeiten auftreten können.

Klimatologische Kenngrößen

Es gibt unterschiedliche Systematiken klimatologischer Kenngrößen. Dieses Kapitel und diese Box bezieht sich auf die vom Deutschen Wetterdienst (DWD) verwendeten Definitionen. Ins Glossar zu diesem Buch wurden die international gängigen Definitionen aufgenommen, die teilweise von den hier beschriebenen abweichen.

- Frosttag: Die Minimumtemperatur des Tages bleibt unterhalb von 0 °C.
- Eistag: Die Maximumtemperatur des Tages bleibt unterhalb von 0 °C.
- Sommertag: Die Maximumtemperatur des Tages erreicht oder überschreitet 25 °C.
- Heißer Tag: Die Tageshöchsttemperatur erreicht oder überschreitet 30 °C.
- Extrem heißer Tag: Die Tageshöchsttemperatur überschreitet 40 °C.

- Tropennacht: Die Minimumtemperatur des Tages bleibt bei über 20 °C.
- *Warm spell duration index (WSDI)*: Wärmeperioden bestehen aus mind. sechs aufeinanderfolgenden Tagen mit Tageshöchsttemperaturen über dem 90. Perzentil; gezählt wird die Jahressumme der Wärmeperioden zugeordneten Tage.
- Hitzewelle: Mehrtägige Periode mit ungewöhnlich hoher thermischer Belastung. International existiert keine einheitliche Definition des Begriffs. Definitionen basieren häufig auf einer Kombination von Schwellenwerten (z. B. 98. Perzentil eines Tagesmaximumwertes von mindestens 30 °C sowie einer minimalen Dauer z. B. drei Tage).

► <https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html?lv3=101452>

6.2.2 Wärmeperioden

Zur Bewertung der Veränderungen länger andauernder warmer Temperaturextreme existieren ebenfalls mehrere Indizes. Hier wird am Beispiel des *warm spell duration index* (Definition ► Abschn. 6.2.1) gezeigt, welche Entwicklungen auf der Basis des Klimaschutz- und Hochemissionsszenario zu erwarten sind. Grundlage bildet der Zustand im Zeitraum zwischen 1971 und 2000. ■ Abb. 6.7 zeigt einen deutlichen Anstieg im Szenarienzeitraum. Das gilt sowohl für das Klimaschutz- als auch insbesondere für das Hochemissions-

szenario. Gemäß einigen Simulationen könnten diese Perioden mehr als 100 Tage andauern.

6.2.3 Regionale Datensätze auf der Basis von CMIP6

In Vorbereitung des 6. Sachstandberichtes des IPCC wurden im Rahmen der 6. Phase des CMIP-Projektes neue Klimaprojektionsläufe erstellt. Basis für diese Projektionsläufe sind neue Szenarien. Es sind Kombinationen aus den schon vorhandenen RCP-Szenarien und sozioökonomischen Entwicklungspfaden *Shared Socioeconomic Pathways/SSPs* (O'Neill et al. 2016; Riahi et al. 2017). Die beiden Szenarienprojekte (RCP + SSP) wurden so konzipiert, dass sie sich gegenseitig ergänzen. Die RCPs legen Pfade für die Treibhausgaskonzentrationen fest und damit auch das Ausmaß der Erwärmung, die bis zum Ende des Jahrhunderts eintreten könnte. Die SSPs hingegen geben die Bühne vor, auf der Emissionsreduzierungen erreicht – oder eben nicht erreicht – werden. Es ist daher immer eine Kombination aus einem RCP und einem SSP-Szenario. Beispiele für diese Kombinationen sind das SSP1-1.9 oder SSP5-8.5). Erste Auswertungen zeigen, dass die Schätzwerte der sogenannten *equilibrium climate sensitivity* (ECS)³ teilweise deutlich zugenommen haben (The CMIP6 landscape 2019; Flynn und Mauritsen 2020). Während dieser Wert bei CMIP5 noch bei 2,1 bis 4,7 °C lag, sind es in CMIP6 1,8 bis 5,6 °C. Damit verbunden ist ein verstärktes Klimasignal. Laut Hausfather (2020) steigt das globale Klimasignal für das Ende des Jahrhunderts vom RCP8.5-Szenario von 4,6 (3,3 bis 5,9 °C) auf 5,0 °C (3,8 bis 7,4 °C) beim SSP5-8.5. In der Literatur läuft aktuell eine intensive Diskussion, inwiefern die ECS-Werte der Modelle problematisch sind (Meehl et al. 2020; Zelinka et al. 2020).

Es gibt bisher nur einen regionalen Datensatz auf Basis dieser erweiterten Szenarien für Europa. Kreienkamp et al. (2020) haben erste regionale Datensätze erzeugt und mit bestehenden verglichen. Während zwischen den mit EPISODES herunterskalierten CMIP5- und CMIP6-Datensätzen von MPI-ESM und NorESM kaum Unterschiede für Deutschland vorhanden sind, ist der Unterschied bei den Modellen CanESM und EC-Earth deutlich. Bei beiden Modellen ist ein Anstieg des Änderungssignales von CMIP5 hin zu CMIP6 in der Größenordnung von ca. 2 °C zu erkennen. Das Klimasignal für Deutschland liegt hier für CanESM5 bei 6,5 °C (2071–2100 versus 1971–2000, bisher 4,8 °C

– CanESM2) und für EC-Earth3 bei 5,2 °C (2071–2100 versus 1971–2000, bisher 3,1 °C – EC-Earth2).

6.3 Kurz gesagt

Teilweise bis in das 19. Jahrhundert zurückreichende Beobachtungsdaten zeigen eine allgemeine Zunahme warmer Temperaturextreme bei gleichzeitiger Abnahme kalter Extreme. Besonders deutlich ist diese Entwicklung im Fall der jahreszeitlichen Mitteltemperaturen von meteorologischem Sommer und Winter zu erkennen.

Aber nicht nur die jahreszeitlichen Mittelwerte haben sich verändert, auch die Verteilung der Tagesmitteltemperaturen zeigt eine Verschiebung in Richtung höherer Temperaturwerte. Damit geht auch eine erhöhte Wahrscheinlichkeit für das Auftreten heißer Tage einher. Deutlich zeigt sich, dass die Anzahl warmer Tage und Nächte angestiegen und die Anzahl kalter Tage und Nächte seit den 1950er-Jahren zurückgegangen ist.

Für die Zukunft lassen Klimaprojektionen insbesondere bei unverminderter Treibhausgasemission (Hochemissionsszenario) eine deutliche Verschärfung der bereits beobachteten Entwicklung erwarten. Unter den Annahmen des Hochemissionsszenario steigt die globale Mitteltemperatur bis zum Ende des 21. Jahrhunderts im Mittel um 3 bis 4,2 °C. Im Vergleich zur Tagesmitteltemperatur ist mit einem mindestens ähnlich hohen Anstieg der Tagesextrema zu rechnen. Die Klimaprojektionen zeigen eine deutliche Änderung aller temperaturbezogenen Extremindizes an, besonders für das Hochemissionsszenario sowie die ferne Zukunft. Die Änderungskarte weist auf ein regional stark unterschiedliches Klimasignal hin. Beim Klimaschutzszenario ist die Änderung deutlich geringer.

Literatur

- Auer I, Matulla C, Böhm R, Ungersböck M, Maugeri M, Nanni T, Pastorelli R (2005) Sensitivity of frost occurrence to temperature variability in the European Alps. *Int J Climatol* 25:1749–1766
- Becker P, Imbery F, Friedrich K, Rauthe M, Matzarakis A, Grätz A, Janssen W (2015) Klimatologische Einschätzung des Sommer 2015. Abteilung Klimaüberwachung, Deutscher Wetterdienst
- Bissolli P, Deutschländer T, Imbery F, Haeseler S, Lefebvre C, Blahak J, Fleckenstein R, Breyer J, Rocek M, Kreienkamp F, Röchner S, Schreiber K-J (2019) Hitzewelle Juli 2019 in Westeuropa – neuer nationaler Rekord in Deutschland. Abteilung Klimaüberwachung, Deutscher Wetterdienst
- Casanueva A, Kotlarski S, Fischer AM, Flouris AD, Kjellstrom T, Lemke B, Nybo L, Schwierz C, Liniger MA (2020) Escalating environmental summer heat exposure—a future threat for the European workforce. *Reg Environ Change* 20:40
- Ciarlo JM, Coppola E, Fantini A et al (2021) A new spatially distributed added value index for regional climate models: the

³ Die *equilibrium climate sensitivity* beschreibt den Temperaturanstieg, der bei einer Verdopplung der CO₂-Konzentrationen in der Atmosphäre auftritt.

- EURO-CORDEX and the CORDEX-CORE highest resolution ensembles. *Clim Dyn* 57:1403–1424
- Coffel ED, Horton RM, de Sherbinin A (2017) Temperature and humidity based projections of a rapid rise in global heat stress exposure during the 21st century. *Environ Res Lett* 13:014001
- Dalelani C, Deutschländer T (2013) A robust estimator for the intensity of the Poisson point process of extreme weather events. *Weather and Clim Extremes* 1:69–76
- DWD (2020) DWD-Stationen Duisburg-Baerl und Tönisvorst jetzt Spitzenreiter mit 41,2 Grad Celsius. Deutscher Wetterdienst annulliert deutschen Temperaturrekord in Lingen. Deutscher Wetterdienst
- Eyring V, Bony S, Meehl GA, Senior CA, Stevens B, Stouffer RJ, Taylor KE (2016) Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geosci Model Dev* 9:1937–1958
- Fischer EM, Schär C (2008) Future changes in daily summer temperature variability: driving processes and role for temperature extremes. *Clim Dyn* 33:917
- Flynn CM, Mauritsen T (2020) On the climate sensitivity and historical warming evolution in recent coupled model ensembles. *Atmos Chem Phys* 20:7829–7842
- Hänsel S, Brendel C, Fleischer C, Ganske A, Haller M, Helms M, Jensen C, Jochumsen K, Möller J, Krähenmann S (2020) Vereinbarungen des Themenfeldes 1 im BMVI-Expertenetzwerk zur Analyse von klimawandelbedingten Änderungen in Atmosphäre und Hydrosphäre
- Hartmann DL, Klein Tank AMG, Rusticucci M, Alexander LV, Brönnimann S, Charabi YAR, Dentener FJ, Dlugokencky EJ, Easterling DR, Kaplan A, Soden BJ, Thorne PW, Wild M, Zhai P, (2013) Observations: Atmosphere and surface. *Climate Change*, (2013) the Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, US
- Hausfather Z (2020) CMIP6: the next generation of climate models explained. *Carbon Brief*
- Hübener H, Bülow K, Fooker C et al. (2017) ReKliEs-De Ergebnisbericht. World Data Center for Climate (WDCC) at DKRZ
- Imbery F, Friedrich K, Koppe C, Janssen W, Pfeifroth U, Daßler J, Bissolli P (2018) 2018 wärmster Sommer im Norden und Osten Deutschland. Abteilungen für Klimaüberwachung, Hydrometeorologie und Agrarmeteorologie, Deutscher Wetterdienst
- Imbery F, Kaspar F, Friedrich K, Plückhahn B (2021) Klimatologischer Rückblick auf 2020: Eines der wärmsten Jahre in Deutschland und Ende des bisher wärmsten Jahrzehnts. Abteilungen für Klimaüberwachung und Agrarmeteorologie, Deutscher Wetterdienst
- IPCC (2014) *Climate Change 2014: Synthesis Report*. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. In: Pachauri RK and Meyer LA (Hrsg). IPCC, Geneva, Switzerland
- IPCC (2021) *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. In: Masson-Delmotte V et al. (Hrsg). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA
- IPCC (2019) *Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems*. In: Shukla PR et al. (Hrsg). Intergovernmental Panel on Climate Change
- IPCC (2012) *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate*
- Change Adaptation. In: Field CB, Barros V, Stocker TF, Dahe Q, Jon Dokken D, Ebi KL, Mastrandrea MD, Mach KJ, Plattner GK, Allen SK, Tignor M and Midgley PM (Hrsg) A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA
- Jacob D, Petersen J, Eggert B et al (2014) EURO-CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research. *Reg Environ Change* 14:563–578
- Jacob D, Teichmann C, Sobolowski S et al (2020) Regional climate downscaling over Europe: perspectives from the EURO-CORDEX community. *Reg Environ Change* 20:51
- Jerez S, López-Romero JM, Turco M, Jiménez-Guerrero P, Vautard R, Montávez JP (2018) Impact of evolving greenhouse gas forcing on the warming signal in regional climate model experiments. *Nat Commun* 9:1304
- Klok EJ, Klein Tank AMG (2009) Updated and extended European dataset of daily climate observations. *Int J Climatol* 29:1182–1191
- Koppe C, Jendritzky G, Pfaff G (2003) Die Auswirkungen der Hitzewelle 2003 auf die Gesundheit. *Klimastatusbericht 2003*. Deutscher Wetterdienst, Offenbach am Main
- Kornhuber K, Coumou D, Vogel E, Lesk C, Donges JF, Lehmann J, Horton RM (2020) Amplified Rossby waves enhance risk of concurrent heatwaves in major breadbasket regions. *Nat Clim Chang* 10:48–53
- Kornhuber K, Osprey S, Coumou D, Petri S, Petoukhov V, Rahmsdorf S, Gray L (2019) Extreme weather events in early summer 2018 connected by a recurrent hemispheric wave-7 pattern. *Environ Res Lett* 14:054002
- Kreienkamp F, Lorenz P, Geiger T (2020) Statistically downscaled CMIP6 projections show stronger warming for Germany. *Atmosphere* 11:1245
- Mann ME (2019) The Weather Amplifier Strange waves in the jet stream foretell a future full of heat waves and floods. *Sci Am* 320:42–49
- Manning C, Widmann M, Bevacqua E, Van Loon AF, Maraun D, Vrac M (2019) Increased probability of compound long-duration dry and hot events in Europe during summer (1950–2013). *Environ Res Lett* 14:094006
- Matulla C, Namyslo J, Andre K, Chimani B, Fuchs T (2016) Design Guideline for a Climate Projection Data Base and Specific Climate Indices for Roads: CliPDaR. *Materials and Infrastructures* 2
- Matulla C, Namyslo J, Andre K, Chimani B, Fuchs T (2014) Design guideline for a climate projection data base and specific climate indices for roads: CliPDaR. *Transport Research Arena*
- Meehl GA, Senior CA, Eyring V, Flato G, Lamarque J-F, Stouffer RJ, Taylor KE, Schlund M (2020) Context for interpreting equilibrium climate sensitivity and transient climate response from the CMIP6 Earth system models. *Science Advances* 6:eaba1981
- Moss RH, Edmonds JA, Hibbard KA et al (2010) The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature* 463:747–756
- O'Neill BC, Tebaldi C, van Vuuren DP, Eyring V, Friedlingstein P, Hurtt G, Knutti R, Kriegler E, Lamarque JF, Lowe J, Meehl GA, Moss R, Riahi K, Sanderson BM (2016) The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6. *Geosci Model Dev* 9:3461–3482
- Riahi K, Rao S, Krey V, Cho C, Chirkov V, Fischer G, Kindermann G, Nakicenovic N, Rafaj P (2011) RCP 8.5—A scenario of comparatively high greenhouse gas emissions. *Climatic Change* 109:33
- Riahi K, van Vuuren DP, Kriegler E et al (2017) The Shared Socio-economic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview. *Glob Environ Chang* 42:153–168
- Robine J-M, Cheung SLK, Le Roy S, Van Oyen H, Griffiths C, Michel J-P, Herrmann FR (2008) Death toll exceeded 70,000 in Europe during the summer of 2003. *CR Biol* 331:171–178

- Taylor KE, Stouffer RJ, Meehl GA (2012) An Overview of CMIP5 and the Experiment Design. *Bull Am Meteor Soc* 93:485–498
- The CMIP6 landscape (2019) *Nature Clim Change* 9:727–727
- Vuuren DP van, Edmonds J, Kainuma M et al (2011a) The representative concentration pathways: an overview. *Clim Change* 109:5
- Vuuren DP van, Stehfest E, den Elzen MGJ, Kram T, van Vliet J, Deetman S, Isaac M, Klein Goldewijk K, Hof A, Mendoza Beltran A, Oostenrijk R, van Ruijven B (2011b) RCP2.6: exploring the possibility to keep global mean temperature increase below 2 °C. *Climatic Change* 109:95
- Vautard R, van Aalst M, Boucher O et al (2020) Human contribution to the record-breaking June and July 2019 heatwaves in Western Europe. *Environ Res Lett* 15:094077
- World Meteorological Organization (2017) WMO guidelines on the calculation of climate normals. World Meteorological Organization Geneva, Switzerland
- Zelinka MD, Myers TA, McCoy DT, Po-Chedley S, Caldwell PM, Ceppi P, Klein SA, Taylor KE (2020) Causes of higher climate sensitivity in CMIP6 models. *Geophysical Research Letters* 47. ► <https://doi.org/10.1029/2019GL085782>
- Zier C, Müller C, Komischke H, Steinbauer A, Bäse F, Poschinger A (2020) Das Bayerische Klimaprojektionsensemble Audit und Ensemblebildung. Bayerisches Landesamt für Umwelt
- Zscheischler J, Fischer EM (2020) The record-breaking compound hot and dry 2018 growing season in Germany. *Weather and Climate Extremes* 29:100270

Open Access Dieses Kapitel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz (► <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>) veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Die in diesem Kapitel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.

