

# Klimawandel weltweit und in Deutschland

von Daniela Jacob<sup>1</sup>, Katharina Bülow<sup>2</sup>, Jörg Cortekar<sup>3</sup>, Juliane Petersen<sup>4</sup>

## ABSTRACT

**Das Klima verändert sich weltweit sicht- und spürbar.** Die globale Erwärmung beträgt bereits 1 °C im Vergleich zum vorindustriellen Niveau, Extremereignisse treten stärker und häufiger auf. Projektionen des künftigen Klimas erfolgen auf Basis verschiedener Szenarien mithilfe von Klimamodellen. Sie zeigen, dass bis zum Ende des Jahrhunderts bei unveränderten CO<sub>2</sub>-Emissionen die weltweite Durchschnittstemperatur um 3 °C bis 5 °C gegenüber dem vorindustriellen Zeitalter steigen kann – über Land deutlich stärker als über Wasser. Der Klimawandel hat weitreichende Auswirkungen auf alle ökologischen, ökonomischen und sozialen Systeme. Allerdings können die dramatischsten Veränderungen durch schnelles, mutiges und ambitioniertes Handeln noch vermieden werden.

**Schlüsselwörter:** Klimawandel, Beobachtungen, Klimaprojektionen, Auswirkungen, Handlungsoptionen

**Climate is changing visibly and noticeably worldwide.** Global warming is already at 1 °C compared to pre-industrial levels, and extreme events are becoming more intense and more frequent. Climate projections are based on various scenarios. These scenarios show that with unchanged CO<sub>2</sub> emissions, by the end of the century the global average temperature will have increased by approximately 3 °C to 5 °C (above the pre-industrial level). Temperatures over land will rise significantly more than over water. Climate change has far-reaching impacts on all ecological, economic, and social systems. However, the most dramatic changes can still be avoided through rapid, courageous, and ambitious action.

**Keywords:** climate change, observations, climate projections, impacts, options

## 1 Das sich aktuell wandelnde Klima

Anfang 2020: Australien brennt, extreme Regenfälle führen zu Überschwemmungen in Indonesien, und Deutschland erlebt einen sehr warmen Winter. Wetter und Klima ändern sich. Seit 1990 fasst der Weltklimarat (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) den Sachstand zum Klimawandel und die Rolle des Menschen dabei wissenschaftlich fundiert in zahlreichen Berichten und Sondergutachten zusammen. Es geht dabei unter anderem um die Folgen für die Eisschilde der Antarktis und Grönlands, für den Meeresspiegel und die Meereschemie, für Schneefall und Regenmengen,

für Gletscher und auch für Extremwetterereignisse. Dabei wird eines immer deutlicher: Der Klimawandel findet statt; er ist entsprechend der letzten IPCC-Berichte im Wesentlichen durch den Menschen verursacht (IPCC 2013; IPCC 2014; IPCC 2018) und hat gravierende Folgen für Menschen, Ökosysteme und damit letztlich auch für die Wirtschaft. Laut der jährlich vom World Economic Forum veröffentlichten „Globalen Risiko-Berichte“ (Global Risk Reports) gehört ein Scheitern beim Klimaschutz und der Anpassung an die Folgen des Klimawandels seit Jahren zu den bedeutendsten Risiken in den Dimensionen Eintrittswahrscheinlichkeit und Auswirkungen.

<sup>1</sup> Prof. Dr. rer. nat. Daniela Jacob, Climate Service Center Germany (GERICS), Helmholtz-Zentrum Geesthacht · Fischertwiete 1 · 20095 Hamburg  
Telefon: 040 226338406 · E-Mail: d.jacob@hzg.de

<sup>2</sup> Dr. rer. nat. Katharina Bülow, Climate Service Center Germany (GERICS), Helmholtz-Zentrum Geesthacht · Fischertwiete 1 · 20095 Hamburg  
Telefon: 040 226338426 · E-Mail: katharina.buelow@hzg.de

<sup>3</sup> Dr. sc. agr. Jörg Cortekar, Climate Service Center Germany (GERICS), Helmholtz-Zentrum Geesthacht · Fischertwiete 1 · 20095 Hamburg  
Telefon: 040 226338445 · E-Mail: joerg.cortekar@hzg.de

<sup>4</sup> Juliane Petersen, Climate Service Center Germany (GERICS), Helmholtz-Zentrum Geesthacht · Fischertwiete 1 · 20095 Hamburg  
Telefon: 0049 40 226338443 · E-Mail: juliane.petersen@hzg.de

Schien das Thema Klimawandel in der Vergangenheit häufig eher ein wissenschaftliches zu sein, ist es seit einiger Zeit in Gesellschaft und Politik angekommen. Die vergangenen Jahre haben für verschiedene Sektoren sehr deutlich gezeigt, dass sich das Klima bereits verändert hat und dass mit diesen Veränderungen sehr dramatische – in Deutschland bisher meist nur ökonomische – Folgen verbunden sind. Beispiele hierfür sind etwa der sehr feuchte Herbst 2017 in Norddeutschland mit Auswirkungen auf die Landwirtschaft oder aber die sehr trockenen Sommer 2018 und 2019 mit ebenfalls deutlich spürbaren Auswirkungen auf Land- und Forstwirtschaft, die Binnenschifffahrt oder den Energiesektor. Zusätzlich erzeugen zivilgesellschaftliche Initiativen wie Fridays for Future einen hohen öffentlichen Druck und erste politische Maßnahmen werden mit dem Klimapaket ergriffen. Im vorliegenden Beitrag wird verdeutlicht, wie sich das Klima bisher verändert hat, wie es sich künftig verändern wird, welche Auswirkungen damit verbunden sein werden und was wir als Gesellschaft tun können, um dem Klimawandel zu begegnen.

## 2 Klimawandel in Vergangenheit und Zukunft

### 2.1 Beobachtete Veränderungen

Die globale Erwärmung verglichen mit dem vorindustriellen Niveau liegt gegenwärtig bei rund  $1\text{ °C}$  (IPCC 2013; NASA o. J.; IPCC 2018); global gesehen waren die Jahre 2015 bis 2018 die heißesten seit Beginn der Wetteraufzeichnungen (NASA 2019). Für diesen Anstieg sind in erster Linie menschliche Aktivitäten verantwortlich (IPCC 2013; IPCC 2014). Hierzu zählen insbesondere das Verbrennen von Kohle, Öl und Gas, die Produktion beziehungsweise der Konsum bestimmter Lebensmittel wie Fleisch sowie das Abholzen der Wälder. In Deutschland liegt der Pro-Kopf-Ausstoß von Treibhausgasen mit etwa neun Tonnen pro Jahr besonders hoch, der globale Durchschnitt liegt bei etwa  $4,8$  Tonnen pro Kopf. Über den Kontinenten ist die Lufttemperatur fast doppelt so stark angestiegen. Dieser Anstieg liegt gemittelt über alle Landflächen bei etwa  $1,5\text{ °C}$  (IPCC 2019a). Globale Temperaturen zeigen, dass der Dezember 2019 erheblich über den durchschnittlichen Dezembertemperaturen lag. Zusammen mit dem Dezember 2015 ist es der wärmste Dezember seit Beginn der Temperaturaufzeichnungen. In ganz Europa lagen die Temperaturen höher als im globalen Mittel (Copernicus Climate Change Services/ECMWF 2019). In Australien war die Dezembertemperatur weit über dem Mittel. Nach den trockenen, kühleren Monaten und einem ungewöhnlich heißen und windigen Sommer gab es optimale Bedingungen für die weiterhin anhaltenden intensiven Waldbrände (Copernicus Cli-

mate Change Services und ECMWF 2019). Nach Informationen des australischen Wetterdienstes war 2019 zudem das wärmste Jahr in Australien seit Beginn der Aufzeichnungen. Die Durchschnittstemperatur lag  $1,52\text{ °C}$  über dem langjährigen Mittel und es gab ungewöhnlich wenig Niederschlag.

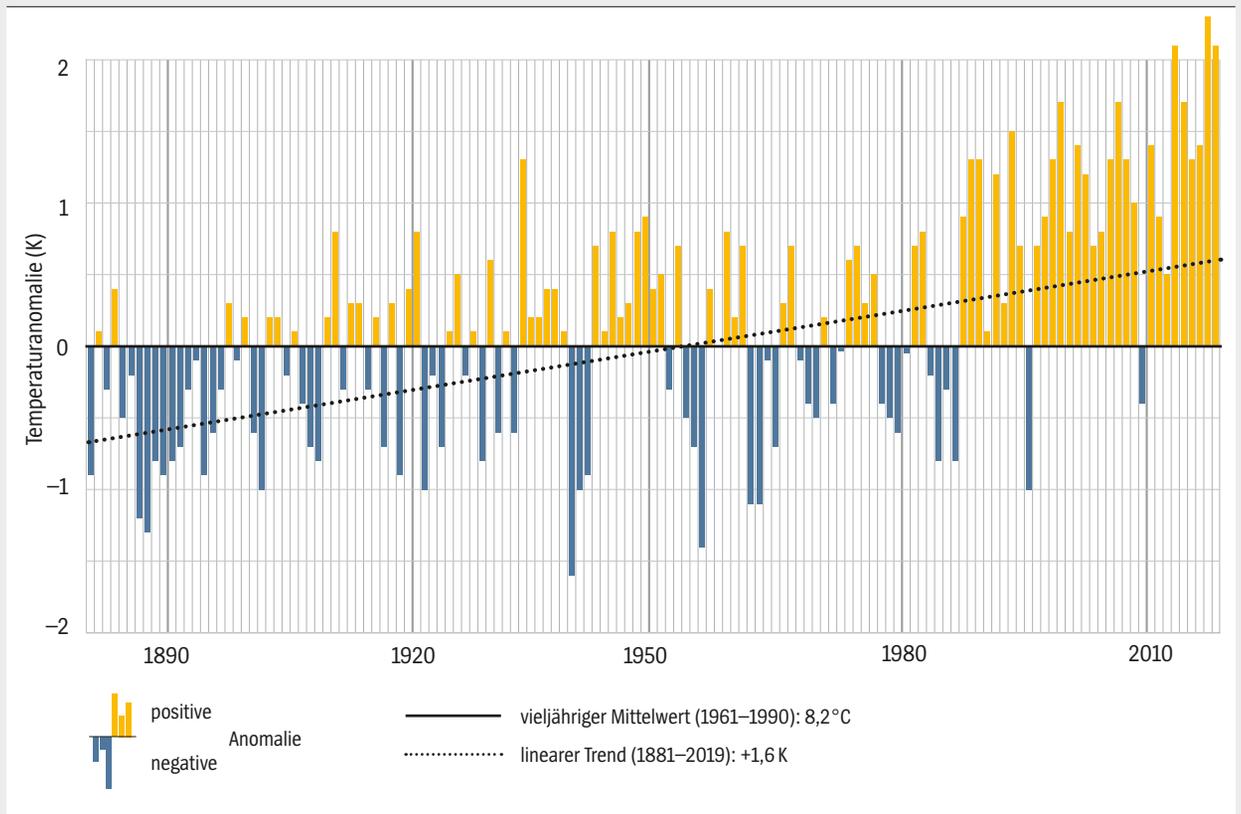
In Deutschland ist die Lufttemperatur um etwa  $1,5\text{ °C}$  angestiegen (UBA 2019, siehe auch Abbildung 1). Das Jahr 2019 kommt nach dem neuen Temperaturrekordjahr 2018 zusammen mit dem Jahr 2014 auf Platz 2 der wärmsten bisher beobachteten Jahre (Kaspar und Friedrich 2020). Zudem sind bereits jetzt die Folgen des fortschreitenden Klimawandels in Form von häufiger und stärker auftretenden Extremwetterereignissen wie Hitzewellen, Dürren oder Starkniederschlägen spürbar (IPCC 2018). In Deutschland ist bereits eine Änderung der Niederschlagsregime zu beobachten. In vielen Regionen haben die winterlichen Starkniederschläge zugenommen, während bei den sommerlichen eine geringfügige, oft nicht signifikante Abnahme zu verzeichnen ist. Außerdem werden bereits höhere Intensitäten bei Starkniederschlagsereignissen beobachtet. Änderungssignale von Hagel, der insbesondere im Süden Deutschlands häufiger auftritt, können nicht direkt aus den Daten der Wetterstationen bestimmt werden. Analysen indirekter Klimadaten (proxies) deuten jedoch auf eine leichte Zunahme des Hagelpotenzials in der Vergangenheit hin. Bedingt durch die beobachtete Temperaturzunahme zeigen Schneedeckendauer und Schneedeckenzeit eine erhebliche Abnahme vor allem in tieferen Lagen. Auch der mittlere globale Meeresspiegel steigt an. Dieser Anstieg hat sich in den vergangenen Jahrzehnten auf  $3,6$  Millimeter pro Jahr beschleunigt (IPCC 2019b).

### 2.2 Klimaprojektionen bis 2100

Wie sich das Klima in Zukunft entwickeln wird, hängt von einer Vielzahl von Faktoren ab. Für den fünften Sachstandsbericht des IPCC, der 2013/14 erschienen ist, wurden sogenannte repräsentative Konzentrationspfade (representative concentration pathways, RCPs) entwickelt, die sich auf Ergebnisse der wissenschaftlichen Literatur stützen. Das Ergebnis sind Szenarien der Treibhausgas-Konzentrationen im Jahr 2100 gegenüber den vorindustriellen Werten von 1850. Die RCPs repräsentieren verschiedene Entwicklungspfade der Konzentrationen von Treibhausgasen, Aerosolen und zugehörigen Emissionen. Sie wurden mit gekoppelten Energie-Ökonomie-Klima-Landnutzungs-Modellen (sogenannte Integrated-Assessment-Modelle) erstellt und bilden konsistente Szenarien zukünftiger Treibhausgas-Emissionen. Mit dem Weiter-wie-bisher-Szenario (RCP8.5) wird ein kontinuierlicher Anstieg der Treibhausgas-Emissionen beschrieben, wohingegen das Klimaschutz-Szenario (RCP2.6) sehr ambitionierte Maßnahmen zur Reduktion von Treibhausgasemissionen beinhaltet. Es hat das Ziel, die globale Erwärmung im Jahr 2100 im Vergleich zu 1850 auf nicht mehr als  $2\text{ °C}$  zu

ABBILDUNG 1

## Temperaturabweichungen der Jahre 1881 bis 2019 gegenüber 1961 bis 1990 in Deutschland



Abweichungen der Temperaturen von den Durchschnittstemperaturen hat es immer schon gegeben. Auffällig ist aber, dass die Gebietsmittel zunehmend in die positive Richtung vom vieljährigen Mittel abweichen. Referenzzeitraum für das vieljährige Mittel ist die Zeit zwischen 1961 und 1990.

Quelle: DWD, Grafik: G+G Wissenschaft 2019

begrenzen. Auf Grundlage der RCPs wurden mithilfe von Klimamodellen neue Projektionen möglicher Klimaänderungen im 21. Jahrhundert und darüber hinaus berechnet.

### 2.2.1 Globaler Klimawandel

Weltweit zeigen Klimamodelle einen möglichen Anstieg der mittleren Lufttemperatur um im Mittel unter 2 °C bei sehr ambitionierten Klimaschutzmaßnahmen (RCP2.6) und um 2,6 bis 4,8 °C bei einem ungebremsten Anstieg der Treibhausgasemissionen (RCP8.5) zum Ende des 21. Jahrhunderts (*IPCC 2013*). Es ist praktisch sicher, dass es mehr heiße und weniger kalte Temperaturextreme über den meisten Landregionen geben wird. Es ist sehr wahrscheinlich, dass Hitzewellen häufiger und länger werden. Weiterhin werden aber auch extrem kalte Winter auftreten können (*IPCC 2013*). Änderungen im globalen Wasserkreislauf sind nicht einheitlich: Feuchte Regionen und Jahreszeiten werden feuchter und tro-

ckene Regionen und Jahreszeiten noch trockener. Allerdings sind regionale Ausnahmen möglich. Es ist sehr wahrscheinlich, dass extreme Niederschlagsereignisse an Land in den mittleren Breiten und in den feuchten Tropen intensiver werden und zum Ende des 21. Jahrhunderts öfter auftreten (*IPCC 2013*). Die Projektionen zeigen, dass der mittlere globale Meeresspiegel im Klimaschutz-Szenario (RCP2.6) um 0,26 bis 0,53 Meter gegen Ende des 21. Jahrhunderts ansteigt und um 0,51 bis 0,92 Meter für das Szenario mit ungebremstem Anstieg der Treibhausgas-Emissionen (RCP8.5).

### 2.2.2 Klimaänderungen in Deutschland

In der nahen Zukunft (2021 bis 2050) steigt die Jahresmitteltemperatur in Deutschland um 0,5 bis 1 °C weiter an. Im Klimaschutz-Szenario (RCP2.6) bleibt sie etwa auf diesem Niveau bis zum Ende des 21. Jahrhunderts, während sie im Weiter-wie-bisher-Szenario um weitere 3,7 °C steigen kann

TABELLE 1

## Änderungen des Klimas in Baden-Württemberg für 2036 bis 2065

Kennwerte	Beobachtungen im Referenzzeitraum, 30-jähriges Flächenmittel 1971 bis 2000	Klimaschutz-Szenario RCP2.6, 30-jähriges Flächenmittel (minimaler und maximaler Wert)	Weiter-wie-bisher-Szenario RCP8.5	Was bringt es, wenn wir dem Klimaschutz-Szenario folgen?
Jahresmitteltemperatur (°C)	8,4 °C	Ca. 1,1 °C Erhöhung (0,5 bis 2,0 °C)	Ca. 1,9 °C Erhöhung (1,4 bis 3,0 °C)	Ca. 0,8 °C weniger Erwärmung
Sommertage (Tage mit Temperaturmaximum > 25 °C)	32 Tage	Rund 9 Tage mehr (3 bis 24 Tage)	Rund 17 Tage mehr (8 bis 24 Tage)	Etwa zweimal geringere Zunahme an Sommertagen
Hitzetage (Tage mit Temperaturmaximum > 30 °C)	5 Tage	Rund 3 Tage mehr (1 bis 9 Tage)	Rund 7 Tage mehr (1 bis 24 Tage)	Etwa zweimal geringere Zunahme an Hitzetagen
Tropische Nächte (Tage mit Temperaturminimum > 20 °C)	0 Nächte	Rund 1 Nacht mehr (0 bis 3 Nächte)	Rund 3 Nächte mehr (0 bis 23 Nächte)	Etwa zwei tropische Nächte weniger

Die Bandbreiten ausgewählter Klimaindizes, gemittelt über Baden-Württemberg, für das Klimaschutz-Szenario (RCP2.6) und das Weiter-wie-bisher-Szenario (RCP8.5) zur Mitte des 21. Jahrhunderts zeigen erkennbare Unterschiede bei den Sommertagen, Hitzetagen und tropischen Nächten.

(DWD 2017). Die Anzahl der Tage mit extremen Temperaturen ändert sich zum Ende des 21. Jahrhunderts im Vergleich zum historischen Zeitraum 1971 bis 2000. Die Sommertage werden im Weiter-wie-bisher-Szenario dreimal mehr zugenommen haben als im Klimaschutz-Szenario. Die Abnahme der Frosttage ist nur halb so groß im Klimaschutz-Szenario wie im Weiter-wie-bisher-Szenario.

Für den mittleren Jahresniederschlag in Deutschland werden kleine Änderungen in der nahen Zukunft (2021 bis 2050) erwartet. In der fernen Zukunft (2071 bis 2100) ist mit einer Zunahme von etwa zehn Prozent im mittleren Jahresniederschlag zu rechnen. Die Klimasimulationen zeigen eine große Bandbreite für die zukünftigen Niederschlagsänderungen. Sie sind regional und jahreszeitlich deutlich unterschiedlich ausgeprägt. Im Weiter-wie-bisher-Szenario lässt sich in der fernen Zukunft (2071 bis 2100) im Mittel eine Niederschlagszunahme im Winter erkennen. Sie ist horizontal variabel und liegt zwischen 10 Prozent und 40 Prozent. Im Gegensatz dazu nimmt der Niederschlag im Sommer zwischen 20 Prozent und 30 Prozent ab. Die Klimaänderungen in Deutschland am Ende des 21. Jahrhunderts im Weiter-wie-bisher-Szenario sind regional sehr unterschiedlich, zum Beispiel steigen die Sommertage in Baden-Württemberg (Tabelle 2; vergleiche auch Tabelle 1) um rund 17 Tage an und damit deutlich stärker

als in Schleswig-Holstein mit einer Zunahme von sechs Tagen. Detaillierte Informationen zu allen Bundesländern und weiteren Indikatoren befindet sich unter [gerics.de](http://gerics.de) (Climate Service Center Germany 2019).

### 3 Auswirkungen des Klimawandels

Der Klimawandel hat global und in Deutschland vielfältige Folgen für nahezu alle ökologischen Systeme, Wirtschaftssektoren und damit letztlich auch auf alle gesellschaftlichen Bereiche. Diese Folgen sind häufig eher mit Gefahren oder negativen Auswirkungen assoziiert. Dies muss aber nicht immer der Fall sein; mit einigen der Folgen sind auch durchaus Chancen verbunden.

Bei einem Blick auf die globale Kryosphäre (IPCC 2019b) – also die Gesamtheit der weltweiten Eis- und Schneemassen sowie Permafrostböden – stellt man fest, dass die globale Erwärmung zu einem starken Masseverlust der Eisschilde und Gletscher geführt hat, die Meereisausdehnung und -dicke am Nordpol stark abgenommen hat, die Schneebedeckung rückläufig ist und die Permafrostböden wärmer werden und beginnen aufzutauen. Diese Veränderungen werden sich laut Projektionen bis etwa zur Mitte des Jahrhunderts fortsetzen.

TABELLE 2

## Änderungen des Klimas in Baden-Württemberg für 2070 bis 2099

Kennwerte	Beobachtungen im Referenzzeitraum, 30-jähriges Flächenmittel 1971 bis 2000	Klimaschutz-Szenario RCP2.6, 30-jähriges Flächenmittel (minimaler und maximaler Wert)	Weiter-wie-bisher-Szenario RCP8.5	Was bringt es, wenn wir dem Klimaschutz-Szenario folgen?
Jahresmitteltemperatur (°C)	8,4 °C	Ca. 1,1 °C Erhöhung (0,5 bis 2,0 °C)	Ca. 3,7 °C Erhöhung (1,4 bis 3,0 °C)	Ca. 2,6 °C weniger Erwärmung
Sommertage (Tage mit Temperaturmaximum > 25 °C)	32 Tage	Rund 10 Tage mehr (2 bis 25 Tage)	Rund 37 Tage mehr (16 bis 75 Tage)	Etwa viermal geringere Zunahme an Sommertagen
Hitzetage (Tage mit Temperaturmaximum > 30 °C)	5 Tage	Rund 3 Tage mehr (0 bis 11 Tage)	Rund 17 Tage mehr (3 bis 58 Tage)	Etwa fünfmal geringere Zunahme an Hitzetagen
Tropische Nächte (Tage mit Temperaturminimum > 20 °C)	0 Nächte	Rund 1 Nacht mehr (0 bis 3 Nächte)	Rund 10 Nächte mehr (1 bis 57 Nächte)	Etwa zehnmal geringere Zunahme an tropischen Nächten

Die Bandbreiten ausgewählter Klimaindizes, gemittelt über Baden-Württemberg, für das Klimaschutz-Szenario (RCP2.6) und das Weiter-wie-bisher-Szenario (RCP8.5) zum Ende des 21. Jahrhunderts zeigen noch deutlichere Unterschiede als in den Jahren 2036 bis 2065.

Bei geringen Anstrengungen beim Klimaschutz werden sich die Prozesse in der zweiten Hälfte des Jahrhunderts tendenziell beschleunigen, wohingegen deutliche Reduzierungen der Treibhausgas-Emissionen die beschriebenen Prozesse im Ausmaß verlangsamen. Die Veränderungen der Kryosphäre an Land wirken sich beispielsweise auf die Wasserverfügbarkeit aus und damit auf die verschiedenen Nutzungsformen wie zum Beispiel Wasserkraft oder die Bewässerung in der Landwirtschaft. In den polaren Gebieten verschieben und verändern sich Lebensräume für Tiere und damit teilweise die Lebensgrundlage der indigenen Völker. Mehr Überschwemmungen, Lawinen, Erdbeben und eine zunehmende Bodendestabilisierung erhöhen das Risiko für Infrastrukturen, Kultur-, Tourismus- und Freizeitgüter.

Der globale Ozean (*IPCC 2019b*) hat sich seit 1970 ungleichmäßig erwärmt, wobei die Geschwindigkeit der Erwärmung seit etwa 25 Jahren deutlich zugenommen hat. Durch die Aufnahme von mehr CO<sub>2</sub> ist die Ozeanoberfläche zunehmend versauert. Laut Projektionen wird der Ozean im Laufe des 21. Jahrhunderts einen Übergang zu noch nie dagewesenen Bedingungen vollziehen. Dies führt zu weiter steigenden Wassertemperaturen, einer stärkeren Schichtung im oberen Ozean, einer weiter zunehmenden Versauerung und wahrscheinlich zu einem weiteren Rückgang des Sauerstoffge-

halts im Wasser. So zeigen aktuelle Studien, dass Warmwasserkorallen weltweit massiv bedroht sind und bei einer Begrenzung der Erwärmung auf 1,5 °C gegenüber dem vorindustriellen Niveau noch überleben können, bei einem weiteren Anstieg auf 2 °C aber vermutlich verloren gehen. Dies hat massive Auswirkungen auf die lokalen Ökosysteme und Nahrungsketten. Zukünftige Verschiebungen der Verbreitungsgebiete von Fischarten sowie Rückgänge ihrer Bestände und des Fangpotenzials aufgrund des Klimawandels können sich auf Einkommen, Lebensgrundlagen und die Ernährungssicherheit von Gemeinschaften auswirken, die von Meeresressourcen abhängig sind. Der langfristige Verlust beziehungsweise die Schädigung mariner Ökosysteme beeinträchtigt die Rolle des Ozeans im Hinblick auf kulturelle, freizeitbezogene und intrinsische Werte, die für die Identität und das Wohlergehen des Menschen wichtig sind.

Der mittlere globale Meeresspiegel (*IPCC 2019b*) steigt an; in den vergangenen Jahrzehnten beschleunigte sich dies sowohl aufgrund der oben beschriebenen Prozesse von Eisverlusten und der thermischen Ausdehnung des Ozeans. Der Meeresspiegelanstieg wird bei einer Begrenzung der globalen Erwärmung auf 1,5 °C dabei etwa zehn Zentimeter geringer ausfallen als bei einer Begrenzung der Erwärmung auf 2 °C. Dies scheint auf den ersten Blick ein vergleichsweise geringer

Unterschied zu sein, hat aber spürbare Auswirkungen, wenn man zum Beispiel an die Salzwassereinträge in die küstennahen Grundwasserkörper denkt. Dies hat dann wiederum Auswirkungen auf die Nutzung küstennaher Gebiete für landwirtschaftliche Aktivitäten, und zwar Tierzucht und Pflanzenbau gleichermaßen. Weitere Auswirkungen, bei denen zehn Zentimeter einen großen Unterschied ausmachen, sind Extremwasserstände und damit verbunden der Küstenschutz. In manchen und insbesondere in tropischen Gebieten können Ereignisse mit einer 100-jährigen Wiederkehrwahrscheinlichkeit künftig jährlich oder sogar mehrmals jährlich auftreten. Dies ist besonders problematisch für tief gelegene Küstengebiete in großen Flussmündungen, wie sie häufig in Südostasien zu finden sind. Küstenökosysteme wie Mangroven, die wichtige Funktionen des Küstenschutzes übernehmen, werden durch die erwähnten Prozesse wie Erwärmung, Versauerung, Sauerstoffverlust und Meeresspiegelanstieg zunehmend beeinträchtigt.

Der Klimawandel hat nicht nur Folgen für die aquatischen, sondern auch für die terrestrischen Systeme. Der Klimawandel wirkt sich bereits heute auf vielfältige Weise auf die Biodiversität (*Klotz und Settele 2017*) aus, und es ist davon auszugehen, dass sich diese Effekte in Zukunft verstärken werden. Betroffen sind alle Organisationsstufen des Lebens, Physiologie und Genetik der Organismen sowie Lebensrhythmus und Verbreitung der Arten. Durch die Veränderung der Lebensräume werden Arten wandern, was problematisch für Nahrungsketten sein kann, wenn Räuber-Beute-Beziehungen erodieren. Problematisch für den Menschen kann dies aus gesundheitlicher Perspektive werden, wenn invasive Arten neue Krankheiten in ein Gebiet tragen, die dort vorher nicht auftraten. Es ist daher grundsätzlich sehr wahrscheinlich, dass der Klimawandel Ökosysteme verändert und sogar neue Ökosysteme erschafft. Dies hat dann Auswirkungen auf die durch die Ökosysteme erbrachten Dienstleistungen für den Menschen, und zwar unabhängig von der Art der Dienstleistung. Bereitstellende Dienstleistungen wie Nahrungsmittel (siehe auch den nächsten Abschnitt zur Landwirtschaft) sind davon gleichermaßen betroffen wie kulturelle Dienstleistungen (zum Beispiel der Verlust eines wertvollen Waldes). Darüber hinaus werden zunehmend ökologische Kippunkte überschritten. Das Kippen ist zum Teil unumkehrbar und führt zum massiven Aussterben von Arten und zur Zerstörung ganzer Ökosysteme (vergleiche Analyse 3, Seite 23).

Der fortschreitende Klimawandel ändert die Witterungsverläufe im Jahr, sodass teilweise herkömmliche Produktionsmethoden in der Landwirtschaft an ihre Grenzen stoßen. In einigen Regionen der Welt haben Klimaänderungen bereits zum Rückgang von Ernteerträgen von zum Beispiel Reis, Mais und Weizen geführt (siehe zum Beispiel den Branchenbericht zur Landwirtschaft unter [klimafakten.de](http://klimafakten.de)). Insbesondere das zu-

nehmende Auftreten von Extremen wie Hitze- und Trockenperioden, Dauer- und Starkregen stellt die Landwirtschaft vor große Herausforderungen. Auch in Deutschland sind in den vergangenen Jahren gehäuft meteorologische Extreme aufgetreten, wie zum Beispiel die extreme Hitze und Trockenheit in den Jahren 2018 und 2019. Dadurch waren Ackerbaubetriebe vielerorts durch reduzierte Ernteerträge etwa bei Weizen, Gerste und Raps betroffen. Wenn sich die Erde weiter erwärmt, werden sich die Witterungsverläufe weiter verändern. Dazu gehören zum Beispiel höhere Temperaturen im Frühsommer, die sich ungünstig auf das Pflanzenwachstum und die Wasserverfügbarkeit durch hohe Verdunstung auswirken. Zudem werden extreme Wetterlagen häufiger auftreten. Sie gehen einher mit längeren Hitzeperioden, vermehrter Trockenheit sowie häufigeren Starkregenereignissen und führen zu reduzierten Ernteerträgen und Ernteaussfällen. Auch Nutztiere leiden vermehrt unter Hitzestress. Das Risiko von Flächenbränden, wie aktuell in Australien zu sehen, nimmt zu und stellt eine direkte Bedrohung von Menschen und Tieren dar.

Ähnlich wie die Landwirtschaft werden auch die Forstwirtschaft beziehungsweise grundsätzlich Wälder (*Köhl et al. 2017*) vom Klimawandel betroffen sein. Bisher waren die klimawandelbedingten Auswirkungen für Wälder vergleichsweise gut handhabbar. Allerdings haben sich die Auswirkungen in den vergangenen Jahren durch Hitze-beziehungsweise Trockenstress zusammen mit weiteren Einflüssen (zum Beispiel Stürmen) sehr deutlich gezeigt. Trockenstress durch weniger Sommerniederschläge und die dadurch beschleunigte Entwicklung von Insekten sowie die steigende Gefahr von Waldbränden und Stürmen werden die Anfälligkeit erhöhen. Ähnlich wie bei der Biodiversität werden auch Baumarten durch Wanderungsbewegungen versuchen, sich den sich wandelnden Bedingungen anzupassen. In Mitteleuropa wird der Eichenwald zunehmen, beginnend in den Tieflagen. Der Buchenwald wandert von den Tieflagen in die Mittelgebirge. Dort werden sich die Kiefern- und Fichtenwälder allmählich zurückziehen. Somit wird sich die Zusammensetzung der Wälder verändern.

Gegenüber den zuvor beschriebenen Naturräumen stellt der Klimawandel für Städte jeder Größe eine besondere Herausforderung dar. Diese sind wegen der hohen Bevölkerungs- und Infrastrukturdichte anfälliger gegenüber verschiedenen Klimafolgen. So sind sie aufgrund der geänderten Landoberfläche in der Regel wärmer als das die jeweilige Stadt umgebende Gelände. Dies kann im Sommer zu Hitzestress beziehungsweise Hitzebelastungen mit entsprechenden Auswirkungen auf die Bevölkerung (insbesondere für ältere Menschen) führen. Die veränderte Landoberfläche und insbesondere der hohe Versiegelungsgrad der Oberfläche machen Städte anfällig bei Starkniederschlägen. Diese Art von Extremereignissen wird, wie oben beschrieben, künftig häufiger und intensiver auftreten. Die Folgen sind Überflutungen mit

entsprechenden Beeinträchtigungen für wichtige funktionale Infrastrukturen wie Energieversorgung, Wasserver- und -entsorgung, Verkehr. Diese Systeme sind in Städten eng miteinander verzahnt und können im Extremfall über sogenannte Domino- oder Kaskadeneffekte einen gegenseitigen Ausfall bewirken.

## 4 Ausblick: Was wir tun können

Ohne zusätzliche Klimaschutzmaßnahmen wird die globale Mitteltemperatur bis zum Ende des 21. Jahrhundert um 3,5 bis 5 °C gegenüber dem vorindustriellen Niveau zunehmen (*IPCC 2013; IPCC 2014*). Auch mit den derzeit angestrebten Klimaschutzmaßnahmen wird die globale Mitteltemperatur um mehr als 3 °C ansteigen (*WMO 2019*). Nur bei sofortigen zusätzlichen ausreichenden Klimaschutzmaßnahmen besteht die Wahrscheinlichkeit zur Begrenzung des globalen Temperaturanstiegs auf deutlich unter 2 °C (*IPCC 2018*). Zusammenfassend macht eine Begrenzung der globalen Erwärmung auf 1,5 °C nie dagewesene Veränderungen notwendig, wie beispielsweise:

- drastische Emissionsreduktionen in allen Sektoren,
- die Entwicklung und Nutzung neuer Technologien,
- Verhaltensänderungen,
- die Umlenkung von Investitionen in CO<sub>2</sub>-freie Technologien und
- starkes politisches Handeln.

Konkret bedeutet dies, den Ausstoß des Treibhausgases CO<sub>2</sub> bis 2030 global um 45 Prozent gegenüber dem Wert von 2010 zu verringern. Bis 2050 müsste Klimaneutralität erreicht werden. Dies bedeutet nicht, wie häufig zu lesen ist, dass kein CO<sub>2</sub> mehr emittiert werden darf, sondern dass die nicht zu vermeidenden Emissionen technisch wieder aus der Atmosphäre entfernt werden müssen. Dies macht nicht nur den Ausbau erneuerbarer Energien, sondern auch den Einsatz innovativer Technologien des *carbon capture and re-use* notwendig. Hierbei wird CO<sub>2</sub> abgeschieden und als Rohstoff für andere Produktionsprozesse verwendet. Zugleich erfordert dies aber auch Verhaltensänderungen insbesondere im Konsum, bei der Ernährung, dem Energieverbrauch und der Mobilität.

Lokale Handlungsoptionen zum Umsetzen von Klimaschutz und zur Anpassung an den Klimawandel lassen sich zum Beispiel sehr klar im Bereich der Planung und Umsetzung von Bauvorhaben darstellen. Eine direkte Überlagerung der beiden Bereiche während der Planung und Umsetzung ist auch im heutigen Genehmigungssystem schon gut möglich. Eine derartig fundamentale Transformation der Gesellschaft in nahezu allen Bereichen erfordert ambitionierte politische Leitlinien. Auch hier ist der jüngste IPCC-

Sonderbericht eindeutig: Es gibt keine technischen oder ökonomischen Gründe, die der Erreichung des 1,5-Grad-Ziels im Wege stehen – gegenwärtig mangelt es vor allem an politischem Willen.

### Literatur

- Climate Service Center Germany (GERICS) (2019):** GERICS-Bundesländer-Check; [gerics.de](https://gerics.de) → Produkte → Karten und Visualisierungen
- Climate Service Center Germany (GERICS), KfW Entwicklungsbank (2015):** Climate Focus Paper: Cities and Climate Change; [gerics.de](https://gerics.de) → Produkte → Fact Sheets → Climate-Focus-Papers
- Copernicus Climate Change Services, ECMWF (2019):** Surface Air Temperature for December 2019; [climate.copernicus.eu/surface-air-temperature-december-2019](https://climate.copernicus.eu/surface-air-temperature-december-2019)
- DWD (Deutscher Wetterdienst) (2017):** Nationaler Klimareport, 3. korrigierte Auflage. Offenbach am Main: Deutscher Wetterdienst; [dwd.de/DE/leistungen/nationalerklimateport/download\\_report\\_aufgabe-3.html](https://dwd.de/DE/leistungen/nationalerklimateport/download_report_aufgabe-3.html)
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2013):** Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. In: Stocker TF et al. (Hrsg.): Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2014):** Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. In: Field CB et al. (Hrsg.): Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 1–32
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2018):** Summary for Policymakers. In: Masson-Delmotte V (Hrsg.): Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the Impacts of Global Warming of 1.5 °C above Pre-Industrial Levels and Related Global Greenhouse Gas Emission Pathways, in the Context of Strengthening the Global Response to the Threat of Climate Change, Sustainable Development, and Efforts to Eradicate Poverty. Geneva: World Meteorological Organization, 3–24
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2019a):** 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. Summary for Policymakers; [www.ipcc.ch/srcccl](https://www.ipcc.ch/srcccl)
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2019b):** Summary for Policymakers. In: Pörtner HO et al. (Hrsg.): IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate. Principality of Monaco, 24th September 2019, 3–45; [report.ipcc.ch/srcccl/pdf/SROCC\\_FinalDraft\\_FullReport.pdf](https://report.ipcc.ch/srcccl/pdf/SROCC_FinalDraft_FullReport.pdf)
- Kaspar F, Friedrich K (2020):** Rückblick auf die Temperatur in Deutschland im Jahr 2019 und die langfristige Entwicklung. DWD: Abteilung für Klimaüberwachung; [dwd.de/DE/leistungen/besondereereignisse/temperatur/20200102\\_bericht\\_jahr2019.html](https://dwd.de/DE/leistungen/besondereereignisse/temperatur/20200102_bericht_jahr2019.html)

**Köhl M et al. (2017):** Wald und Forstwirtschaft. In: Brasseur G et al. (Hrsg.): Klimawandel in Deutschland. Berlin, Heidelberg: Springer Spektrum

**Klotz S, Settele J (2017):** Biodiversität. In: Brasseur G et al. (Hrsg.): Klimawandel in Deutschland. Berlin, Heidelberg: Springer Spektrum

**NASA (National Aeronautics and Space Administration) (o. J.):** Annual Mean Land-Ocean Temperature Index in 0.01 Degrees Celsius Selected Zonal Means; data.giss.nasa.gov/gistemp/tabledata\_v3/ZonAnn.Ts+dSST.txt

**NASA (National Aeronautics and Space Administration) (2019):** 2018 Fourth Warmest Year in Continued Warming Trend, according to NASA, NOAA; climate.nasa.gov → News and Features → February 6, 2019

**UBA (Umweltbundesamt) (2019):** Monitoringbericht 2019 zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel. Bericht der Interministeriellen Arbeitsgruppe Anpassungsstrategie der Bundesregierung; umweltbundesamt.de → Presse → Pressemitteilungen → Publikationen → November 2019

**WMO (World Meteorological Organization) (2019):** WMO Addresses High-Level Segment of COP25; public.wmo.int/en/media/news/wmo-addresses-high-level-segment-of-cop25

(letzter Zugriff auf alle Internetquellen: 22. Januar 2020)

## DIE AUTOREN



**Prof. Dr. rer. nat. Daniela Jacob,**

Jahrgang 1961, hat Meteorologie an der Technischen Universität Darmstadt studiert. Sie ist Direktorin des Climate Service Center Germany (GERICS), Gastprofessorin an der Leuphana Universität Lüneburg und eine der koordinierenden Hauptautoren des „IPCC-Sonderberichts über 1,5 °C globale Erwärmung“. Sie koordinierte unter anderem das internationale europäische Forschungsprojekt IMPACT2C, das die Auswirkungen von einer globalen Erwärmung um 2 °C auf verschiedene Sektoren untersuchte. Jacob ist Mitglied in mehreren Komitees und Ex-officio-Mitglied der Earth League, einer internationalen Allianz prominenter Wissenschaftler. Darüber hinaus ist sie Chefredakteurin der Zeitschrift „Climate Services“.



**Dr. rer. nat. Katharina Bülow,**

Jahrgang 1968, hat Ozeanographie in Hamburg studiert und promovierte am Max-Planck-Institut für Meteorologie in Hamburg zum Thema „Zeitreihenanalyse von regionalen Temperatur- und Niederschlagssimulationen in Deutschland“. In den vergangenen Jahren vertiefte sie ihr Wissen in der regionalen Klimamodellierung als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Climate Service Center Germany (GERICS).



**Dr. sc. agr. Jörg Cortekar,**

Jahrgang 1976, hat Wirtschaftswissenschaften an der Leibniz Universität Hannover studiert. Von 2004 bis 2007 hat er am Institut für Umwelt- und Ressourcenökonomik an der Georg-August-Universität Göttingen promoviert. Anschließend hat er von 2010 bis 2012 an der Leibniz Universität Hannover am Institut für Marketing und Management und von 2011 bis 2013 am Institut für Umwelt- und Ressourcenökonomik an der Georg-August-Universität in Göttingen gearbeitet. Seit 2013 ist er am Climate Service Center Germany (GERICS) tätig, wo er unter anderem zur Anpassung an die Folgen des Klimawandels im städtischen Raum arbeitet.



**Juliane Petersen,**

Jahrgang 1982, hat Geographie, Umweltmanagement und Geologie an der Humboldt-Universität zu Berlin studiert. Von 2011 bis 2014 war sie wissenschaftliche Mitarbeiterin am Max-Planck-Institut für Meteorologie, Hamburg, im Projekt KLIMZUG-NORD. Seit 2014 ist sie wissenschaftliche Mitarbeiterin am Climate Service Center Germany (GERICS), Hamburg. Ihre Arbeitsschwerpunkte liegen in der Prozessentwicklung für Climate-Services-Prototypen und in der Wissenschaftskoordination.