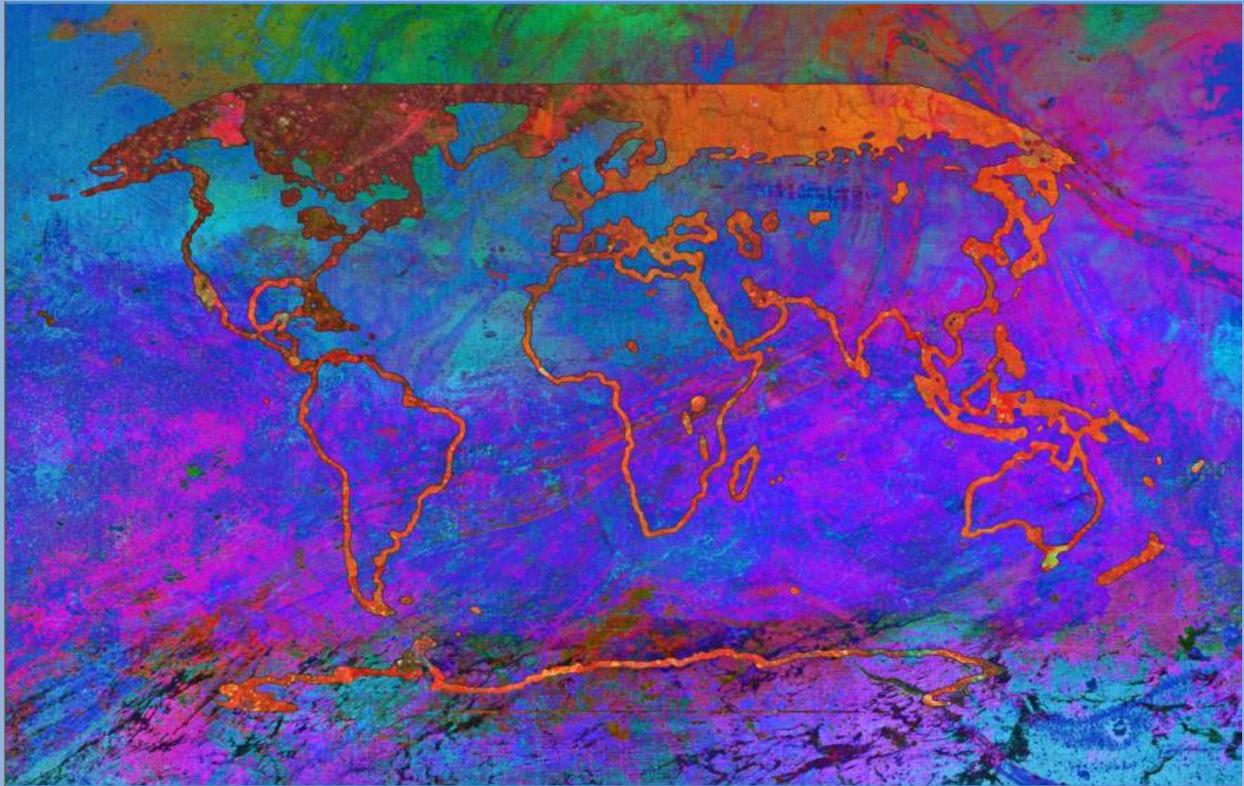


Klimawandel 2021

Naturwissenschaftliche Grundlagen



Zusammenfassung für die politische Entscheidungsfindung

**Beitrag von Arbeitsgruppe I zum Sechsten Sachstandsbericht des
Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderungen (IPCC)**

Vorläufige deutsche Übersetzung (Abbildungen noch nicht übersetzt, endgültiges Layout steht noch aus)

Englisches Original

© 2021 Intergovernmental Panel on Climate Change

IPCC, 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. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. In Press

Herausgegeben von: Zwischenstaatlicher Ausschuss für Klimaänderungen (Intergovernmental Panel on Climate Change IPCC, WMO/UNEP)

Die englische Originalversion dieses Dokuments ist in elektronischer Form auf der IPCC-Webseite unter <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-working-group-i/> erhältlich.

Deutsche Übersetzung

Die vorliegende Übersetzung ist keine offizielle Übersetzung durch den IPCC. Sie wurde erstellt mit dem Ziel, die im Originaltext verwendete Sprache möglichst angemessen wiederzugeben.

Herausgeber:

Deutsche IPCC-Koordinierungsstelle, DLR Projektträger
www.de-ipcc.de | de-ipcc@dlr.de



Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, Österreich | www.bmk.gv.at | vi-1@bmk.gv.at



Akademie der Naturwissenschaften Schweiz SCNAT, ProClim Schweiz | proclim@scnat.ch | www.proclim.ch



Übersetzung: Carola Best unter Mitarbeit von Stefanie Gastrow, Olaf Morgenstern, Urs Neu, Dirk Notz, Manfred Ogris, Johannes Quaas, Thomas Reineke, Thomas Voigt, Sönke Zaehle

Mitfinanzierung: Deutsches Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)
Deutsches Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU)
Schweizerisches Bundesamt für Umwelt (BAFU)

Diese Übersetzung kann von den Webseiten www.de-ipcc.de, www.proclim.ch und www.umweltbundesamt.at als PDF-Datei heruntergeladen werden.

Als Gremium der Vereinten Nationen veröffentlicht der IPCC seine Berichte in den sechs offiziellen VN-Sprachen (Arabisch, Chinesisch, Englisch, Französisch, Russisch, Spanisch). Versionen in diesen Sprachen stehen auf www.ipcc.ch zum Herunterladen zur Verfügung. Weitere Informationen erteilt das IPCC-Sekretariat (Adresse: 7bis Avenue de la Paix, C.P. 2300, 1211 Geneva 2, Schweiz; E-Mail: ipcc-sec@wmo.int).

Zusammenfassung für die politische Entscheidungsfindung

Autorinnen und Autoren des Entwurfs:

Richard P. Allan (Vereinigtes Königreich), Paola A. Arias (Kolumbien), Sophie Berger (Frankreich/Belgien), Josep G. Canadell (Australien), Christophe Cassou (Frankreich), Deliang Chen (Schweden), Annalisa Cherchi (Italien), Sarah L. Connors (Frankreich/Vereinigtes Königreich), Erika Coppola (Italien), Faye Abigail Cruz (Philippinen), Aïda Diongue-Niang (Senegal), Francisco J. Doblas-Reyes (Spanien), Hervé Douville (Frankreich), Fatima Driouech (Marokko), Tamsin L. Edwards (Vereinigtes Königreich), François Engelbrecht (Südafrika), Veronika Eyring (Deutschland), Erich Fischer (Schweiz), Gregory M. Flato (Kanada), Piers Forster (Vereinigtes Königreich), Baylor Fox-Kemper (USA), Jan S. Fuglestedt (Norwegen), John C. Fyfe (Kanada), Nathan P. Gillett (Kanada), Melissa I. Gomis (Frankreich/Schweiz), Sergey K. Gulev (Russische Föderation), José Manuel Gutiérrez (Spanien), Rafiq Hamdi (Belgien), Jordan Harold (Vereinigtes Königreich), Mathias Hauser (Schweiz), Ed Hawkins (Vereinigtes Königreich), Helene T. Hewitt (Vereinigtes Königreich), Tom Gabriel Johansen (Norwegen), Christopher Jones (Vereinigtes Königreich), Richard G. Jones (Vereinigtes Königreich), Darrell S. Kaufman (USA), Zbigniew Klimont (Österreich/Polen), Robert E. Kopp (USA), Charles Koven (USA), Gerhard Krinner (Frankreich/Deutschland, Frankreich), June-Yi Lee (Republik Korea), Irene Lorenzoni (Vereinigtes Königreich/Italien), Jochem Marotzke (Deutschland), Valérie Masson-Delmotte (Frankreich), Thomas K. Maycock (USA), Malte Meinshausen (Australien/Deutschland), Pedro M.S. Monteiro (Südafrika), Angela Morelli (Norwegen/Italien), Vaishali Naik (USA), Dirk Notz (Deutschland), Friederike Otto (Vereinigtes Königreich/Deutschland), Matthew D. Palmer (Vereinigtes Königreich), Izidine Pinto (Südafrika/Mosambik), Anna Pirani (Italien), Gian-Kasper Plattner (Schweiz), Krishnan Raghavan (Indien), Roshanka Ranasinghe (Niederlande/Sri Lanka, Australien), Joeri Rogelj (Vereinigtes Königreich/Belgien), Maisa Rojas (Chile), Alex C. Ruane (USA), Jean-Baptiste Sallée (Frankreich), Bjørn H. Samset (Norwegen), Sonia I. Seneviratne (Schweiz), Jana Sillmann (Norwegen/Deutschland), Anna A. Sörensson (Argentinien), Tannecia S. Stephenson (Jamaika), Trude Storelvmo (Norwegen), Sophie Szopa (Frankreich), Peter W. Thorne (Irland/Vereinigtes Königreich), Blair Trewin (Australien), Robert Vautard (Frankreich), Carolina Vera (Argentinien), Noureddine Yassaa (Algerien), Sönke Zaehle (Deutschland), Panmao Zhai (China), Xuebin Zhang (Kanada), Kirsten Zickfeld (Kanada/Deutschland)

Autorinnen und Autoren mit Beiträgen zum Entwurf:

Krishna M. AchutaRao (Indien), Bhupesh Adhikary (Nepal), Edvin Aldrian (Indonesien), Kyle Armour (USA), Govindasamy Bala (Indien/USA), Rondrotiana Barimalala (Südafrika/Madagaskar), Nicolas Bellouin (Vereinigtes Königreich/Frankreich), William Collins (Vereinigtes Königreich), William D. Collins (USA), Susanna Corti (Italien), Peter M. Cox (Vereinigtes Königreich), Frank J. Dentener (EU/Niederlande), Claudine Dereczynski (Brasilien), Alejandro Di Luca (Australien, Kanada/Argentinien), Alessandro Dosio (Italien), Leah Goldfarb (Frankreich/USA), Irina V. Gorodetskaya (Portugal/Belgien, Russische Föderation), Pandora Hope (Australien), Mark Howden (Australien), A. K. M Saiful Islam (Bangladesch), Yu Kosaka (Japan), James Kossin (USA), Svitlana Krakovska (Ukraine), Chao Li (China), Jian Li (China), Thorsten Mauritsen (Deutschland/Dänemark), Sebastian Milinski (Deutschland), Seung-Ki Min (Republik Korea), Thanh Ngo Duc (Vietnam), Andy Reisinger (Neuseeland), Lucas Ruiz (Argentinien), Shubha Sathyendranath (Vereinigtes Königreich/Kanada, Überseeischer Staatsbürger von Indien), Aimée B. A. Slangen (Niederlande), Chris Smith (Vereinigtes Königreich), Izuru Takayabu (Japan), Muhammad Irfan Tariq (Pakistan), Anne-Marie Treguier (Frankreich), Bart van den Hurk (Niederlande), Karina von Schuckmann (Frankreich/Deutschland), Cunde Xiao (China)

Zitiervorschrift:

IPCC, 2021: Zusammenfassung für die politische Entscheidungsfindung. In: Naturwissenschaftliche Grundlagen. *Beitrag von Arbeitsgruppe I zum Sechsten Sachstandsbericht des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderungen* [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. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. In Druck. Deutsche Übersetzung auf Basis der Druckvorlage, Oktober 2021. Deutsche IPCC-Koordinierungsstelle, Bonn; Akademie der Naturwissenschaften Schweiz SCNAT, ProClim, Bern; Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, Wien, Oktober 2021.

Einleitung

Diese Zusammenfassung für die politische Entscheidungsfindung (*Summary for Policymakers*, SPM) enthält die wichtigsten Erkenntnisse („Schlüsselerkenntnisse“, *key findings*) des Beitrags von Arbeitsgruppe I (WGI) zum Sechsten IPCC-Sachstandsbericht (AR6)¹ über die naturwissenschaftlichen Grundlagen des Klimawandels. Der Bericht baut auf dem Beitrag von Arbeitsgruppe I zum Fünften IPCC-Sachstandsbericht (*Fifth Assessment Report*, AR5) von 2013 sowie den IPCC-Sonderberichten von 2018-2019² des sechsten Berichtszyklus auf und bezieht danach erschienene neue Belege* aus der Forschung zum Klimawandel ein³.

Diese SPM bietet eine übergreifende Zusammenfassung des Wissens über den aktuellen Zustand des Klimas – einschließlich darüber, wie es sich verändert und welche Rolle der Einfluss des Menschen dabei spielt –, den Kenntnisstand über mögliche Klimazukünfte, für Regionen und Sektoren relevante Klimainformationen sowie über die Begrenzung des vom Menschen verursachten Klimawandels.

Auf der Grundlage des wissenschaftlichen Verständnisses können Schlüsselerkenntnisse als Tatsachenaussagen formuliert oder mit einem bewerteten Vertrauensniveau verbunden sein, das in der IPCC-Sprachregelung⁴ angegeben wird.

¹ Beschluss IPCC/XLVI-2

² Die drei Sonderberichte sind: 1,5 °C globale Erwärmung: IPCC-Sonderbericht über die Folgen einer globalen Erwärmung um 1,5 °C gegenüber vorindustriellem Niveau und die damit verbundenen globalen Treibhausgasemissionspfade im Zusammenhang mit einer Stärkung der weltweiten Reaktion auf die Bedrohung durch den Klimawandel, nachhaltiger Entwicklung und Anstrengungen zur Beseitigung von Armut (SR1.5); Klimawandel und Landsysteme: Ein IPCC-Sonderbericht über Klimawandel, Desertifikation, Landdegradierung, nachhaltiges Landmanagement, Ernährungssicherheit und Treibhausgasflüsse in terrestrischen Ökosystemen" (SRCCL); IPCC-Sonderbericht über den Ozean und die Kryosphäre in einem sich wandelnden Klima (SROCC).

* Anmerkung d. Übers.: In dieser Übersetzung wird der weitgefaste englische Ausdruck „evidence“ mit dem Ausdruck „Belege“ wiedergegeben, wobei damit die Summe der vorhandenen Informationen gemeint ist, die je nach Einzelfall einfache Indizien/Hinweise bis zu weitgehend gesicherten Informationen umfassen kann.

³ Die Bewertung umfasst wissenschaftliche Literatur, die bis zum 31. Januar 2021 zur Veröffentlichung angenommen wurde.

⁴ Jede Erkenntnis stützt sich auf eine Bewertung der zugrundeliegenden Belege und deren Übereinstimmung. Ein Vertrauensniveau wird unter Verwendung von fünf Abstufungen angegeben: sehr gering, gering, mittel, hoch und sehr hoch, und kursiv gesetzt, zum Beispiel *mittleres Vertrauen*. Folgende Begriffe wurden verwendet, um die bewertete Wahrscheinlichkeit eines Ergebnisses anzugeben: praktisch sicher 99–100 % Wahrscheinlichkeit, sehr wahrscheinlich 90–100 %, wahrscheinlich 66–100 %, etwa ebenso wahrscheinlich wie nicht 33–66 %, unwahrscheinlich 0–33 %, sehr unwahrscheinlich 0–10 % und besonders unwahrscheinlich 0–1 %. Zusätzliche Begriffe (extrem wahrscheinlich 95–100 %, eher wahrscheinlich als nicht >50–100 % und extrem unwahrscheinlich 0–5 %) werden ebenfalls verwendet, wo angebracht. Die bewertete Wahrscheinlichkeit wird kursiv gesetzt, zum Beispiel *sehr wahrscheinlich*. Gleiches gilt für den AR5. In diesem Bericht werden, sofern nicht anders angegeben, eckige Klammern [x bis y] verwendet, um die bewertete sehr wahrscheinliche Bandbreite bzw. das 90 %-Intervall anzugeben.

Die wissenschaftliche Grundlage für jede Schlüsselerkenntnis findet sich in den Kapiteln des zugrundeliegenden Berichts und in der integrierten Synthese der Technischen Zusammenfassung (*Technical Summary*, TS) und ist in geschweiften Klammern angegeben. Der AR6 WGI Interaktive Atlas ermöglicht es, diese wichtigen Syntheseergebnisse und unterstützende Informationen zum Klimawandel in allen WGI-Referenzregionen⁵ zu erkunden.

A. Der aktuelle Zustand des Klimas

Seit dem AR5 bieten Verbesserungen von beobachtungsbasierten Angaben und Informationen aus paläoklimatischen Archiven ein umfassendes Bild der einzelnen Komponenten des Klimasystems und ihrer bisherigen Veränderungen. Neue Klimamodellsimulationen, neue Analysen und Methoden, die Belege aus mehreren, unterschiedlichen Untersuchungsansätzen kombinieren, führen zu einem verbesserten Verständnis des menschlichen Einflusses auf ein breiteres Spektrum von Klimavariablen, einschließlich Wetter- und Klimaextreme. Die in diesem Abschnitt betrachteten Zeiträume hängen von der Verfügbarkeit von beobachtungsbasierten Produkten, paläoklimatischen Archiven und fachbegutachteten Studien ab.

A.1 Es ist eindeutig, dass der Einfluss des Menschen die Atmosphäre, den Ozean und die Landflächen erwärmt hat. Es haben weitverbreitete und schnelle Veränderungen in der Atmosphäre, dem Ozean, der Kryosphäre und der Biosphäre stattgefunden.

{2.2, 2.3, Cross-Chapter Box 2.3, 3.3, 3.4, 3.5, 3.6, 3.8, 5.2, 5.3, 6.4, 7.3, 8.3, 9.2, 9.3, 9.5, 9.6, Cross-Chapter Box 9.1} (Abbildung SPM.1, Abbildung SPM.2)

A.1.1 Die seit etwa 1750 beobachteten Konzentrationszunahmen gut durchmischter Treibhausgase (THG) sind eindeutig durch menschliche Aktivitäten verursacht. Seit 2011 (im AR5 berücksichtigte Messungen) sind die Konzentrationen in der Atmosphäre weiter angestiegen und haben 2019 jährliche Mittelwerte von 410 ppm für Kohlendioxid (CO₂), 1866 ppb für Methan (CH₄) und 332 ppb für Lachgas (N₂O) erreicht⁶. Landsysteme und Ozean haben während der vergangenen sechs Jahrzehnte einen nahezu konstanten Anteil (weltweit etwa 56 % pro Jahr) der aus menschlichen Aktivitäten stammenden CO₂-Emissionen aufgenommen, wobei regionale Unterschiede bestehen (*hohes Vertrauen*)⁷.

{2.2, 5.2, 7.3, TS.2.2, Box TS.5}

⁵ Der Interaktive Atlas ist unter <https://interactive-atlas.ipcc.ch> verfügbar.

⁶ Andere THG-Konzentrationen im Jahr 2019 waren: Perfluorierte Kohlenwasserstoffe (PFCs) – 109 Teile pro 1 Billion Teile (parts per trillion, ppt) CF₄-Äquivalent; Schwefelhexafluorid (SF₆) – 10 ppt; Stickstofftrifluorid (NF₃) – 2 ppt; teilhalogenierte Fluorkohlenwasserstoffe (H-FKWs) – 237 ppt H-FKW-134a-Äquivalent; andere im Montreal-Protokoll erfasste Gase (hauptsächlich Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKWs) und teilhalogenierte Fluorchlorkohlenwasserstoffe (H-FCKWs)) – 1032 ppt FCKW-12-Äquivalent. Die Steigerungen gegenüber 2011 betragen 19 ppm für CO₂, 63 ppb für CH₄ und 8 ppb für N₂O.

⁷ Landsysteme und Ozean sind für andere Treibhausgase keine bedeutenden Senken.

- A.1.2 Jedes der vergangenen vier Jahrzehnte war jeweils wärmer als alle Jahrzehnte davor seit 1850. Die globale Oberflächentemperatur⁸ war in den ersten beiden Jahrzehnten des 21. Jahrhunderts (2001–2020) um 0,99 [0,84–1,10] °C höher als 1850–1900⁹. Die globale Oberflächentemperatur war im Zeitraum 2011–2020 um 1,09 [0,95–1,20] °C höher als 1850–1900, wobei der Anstieg über Land (1,59 [1,34–1,83] °C) größer war als über dem Ozean (0,88 [0,68–1,01] °C). Der angegebene Anstieg der globalen Oberflächentemperatur seit dem AR5 ist in erster Linie auf die weitere Erwärmung seit 2003–2012 zurückzuführen (+0,19 [0,16–0,22] °C). Darüber hinaus haben methodische Fortschritte und neue Datensätze etwa 0,1 °C zur aktualisierten Angabe der Erwärmung im AR6 beigetragen¹⁰.
{2.3, Cross-Chapter Box 2.3} (Abbildung SPM.1)
- A.1.3 Die *wahrscheinliche* Bandbreite des gesamten vom Menschen verursachten Anstiegs der globalen Oberflächentemperatur von 1850–1900 bis 2010–2019¹¹ beträgt 0,8 °C bis 1,3 °C, wobei der beste Schätzwert 1,07 °C beträgt. Es ist *wahrscheinlich*, dass gut durchmischte Treibhausgase eine Erwärmung von 1,0 °C bis 2,0 °C und andere menschengemachte Antriebsfaktoren (hauptsächlich Aerosole) eine Abkühlung von 0,0 °C bis 0,8 °C beigetragen haben, sowie dass natürliche Antriebsfaktoren die globale Oberflächentemperatur um -0,1 °C bis +0,1 °C und interne Schwankungen sie um -0,2 °C bis +0,2 °C verändert haben. Es ist *sehr wahrscheinlich*, dass gut durchmischte Treibhausgase der Hauptantriebsfaktor¹² für die Erwärmung der Troposphäre seit 1979 waren. Es ist *äußerst wahrscheinlich*, dass der vom Menschen verursachte Abbau von stratosphärischem Ozon der Hauptantriebsfaktor für die Abkühlung der unteren Stratosphäre zwischen 1979 und Mitte der 1990er Jahre war.
{3.3, 6.4, 7.3, Cross-Section Box TS.1, TS.2.3} (Abbildung SPM.2)
- A.1.4 Die global gemittelten Niederschläge über Land haben *wahrscheinlich* seit 1950 zugenommen, wobei die Zunahme seit den 1980er Jahren schneller war (*mittleres Vertrauen*). Es ist *wahrscheinlich*, dass der Einfluss des Menschen zum Muster der beobachteten Niederschlagsveränderungen seit Mitte des 20. Jahrhunderts beigetragen hat, und *äußerst wahrscheinlich*, dass der Einfluss des Menschen zum Muster der beobachteten Veränderungen des Salzgehalts des oberflächennahen Ozeans beigetragen hat. Die Sturmsugbahnen in den mittleren Breiten haben sich seit den 1980er Jahren auf beiden Halbkugeln *wahrscheinlich* polwärts verschoben, wobei die Trends ausgeprägte jahreszeitliche Unterschiede aufweisen (*mittleres*

⁸ Der Begriff "globale Oberflächentemperatur" (*global surface temperature*) wird in dieser SPM sowohl für die mittlere globale Oberflächentemperatur (*global mean surface temperature*) als auch für die globale oberflächennahe Lufttemperatur (*global surface air temperature*) verwendet. Es besteht *hohes Vertrauen* darin, dass Veränderungen dieser Größen um höchstens 10 % voneinander abweichen, aber widersprüchliche Belege aus mehreren, unterschiedlichen Untersuchungsansätzen führen zu *geringem Vertrauen* in das Vorzeichen (die Richtung) jeglicher Unterschiede im langfristigen Trend. {Cross-Section Box TS.1}

⁹ Der Zeitraum 1850–1900 ist der früheste Zeitraum, in dem weltweit ausreichend vollständige Beobachtungen vorliegen, um die globale Oberflächentemperatur anzugeben, und wird – in Übereinstimmung mit AR5 und SR1.5 – als Näherungswert für vorindustrielle Bedingungen verwendet.

¹⁰ Seit dem AR5 haben methodische Fortschritte und neue Datensätze eine vollständigere räumliche Darstellung von Veränderungen der Oberflächentemperatur geliefert, auch in der Arktis. Diese und andere Verbesserungen haben die Bezifferung der globalen Oberflächentemperaturänderung um etwa 0,1 °C erhöht, aber dieser Anstieg stellt keine zusätzliche physikalische Erwärmung seit dem AR5 dar.

¹¹ Der unterschiedliche Zeitraum gegenüber A.1.2 ergibt sich daraus, dass die Zuordnungsuntersuchungen diesen etwas früheren Zeitraum berücksichtigen. Die beobachtete Erwärmung bis 2010–2019 beträgt 1,06 [0,88–1,21] °C.

¹² In dieser SPM bedeutet "Hauptantriebsfaktor", dass dieser für über 50 % der Veränderung verantwortlich ist.

Vertrauen). Auf der Südhalbkugel hat der Einfluss des Menschen *sehr wahrscheinlich* zur polwärts gerichteten Verschiebung des eng damit verbundenen außertropischen Jetstreams im südlichen Sommer beigetragen.

{2.3, 3.3, 8.3, 9.2, TS.2.3, TS.2.4, Box TS.6}

A.1.5 Der Einfluss des Menschen ist *sehr wahrscheinlich* der Hauptantriebsfaktor für den weltweiten Rückgang von Gletschern seit den 1990er Jahren und für den Flächenrückgang des arktischen Meereises zwischen 1979–1988 und 2010–2019 (Rückgänge von etwa 40 % im September und etwa 10 % im März). Die Fläche antarktischen Meereises zeigte von 1979 bis 2020 keinen signifikanten Trend, was auf regional gegenläufige Trends und große interne Schwankungen zurückzuführen ist. Der Einfluss des Menschen hat *sehr wahrscheinlich* zum Rückgang der Frühjahresschneedecke auf der Nordhalbkugel seit 1950 beigetragen. Es ist *sehr wahrscheinlich*, dass der Einfluss des Menschen zur beobachteten Oberflächenschmelze des Grönländischen Eisschildes in den letzten zwei Jahrzehnten beigetragen hat; es gibt hingegen nur *begrenzte Belege mit mittlerer Übereinstimmung* für einen Einfluss des Menschen auf den Massenverlust des Antarktischen Eisschildes.

{2.3, 3.4, 8.3, 9.3, 9.5, TS.2.5}

A.1.6 Es ist *praktisch sicher*, dass sich der globale obere Ozean (0–700 m) seit den 1970er Jahren erwärmt hat, und es ist *äußerst wahrscheinlich*, dass der Einfluss des Menschen der Hauptantriebsfaktor dafür ist. Es ist *praktisch sicher*, dass vom Menschen verursachte CO₂-Emissionen der Hauptantriebsfaktor für die derzeitige globale Versauerung des oberflächennahen offenen Ozeans sind. Es besteht ein *hohes Vertrauen* darin, dass der Sauerstoffgehalt seit Mitte des 20. Jahrhunderts in vielen Regionen des oberen Ozeans gesunken ist, und *mittleres Vertrauen*, dass der Einfluss des Menschen zu diesem Rückgang beigetragen hat.

{2.3, 3.5, 3.6, 5.3, 9.2, TS.2.4}

A.1.7 Der mittlere globale Meeresspiegel ist zwischen 1901 und 2018 um 0,20 [0,15 bis 0,25] m gestiegen. Die durchschnittliche Geschwindigkeit des Meeresspiegelanstiegs betrug zwischen 1901 und 1971 1,3 [0,6 bis 2,1] mm pro Jahr, stieg zwischen 1971 und 2006 auf 1,9 [0,8 bis 2,9] mm pro Jahr und zwischen 2006 und 2018 weiter auf 3,7 [3,2 bis 4,2] mm pro Jahr (*hohes Vertrauen*). Der Einfluss des Menschen war *sehr wahrscheinlich* der Hauptantriebsfaktor für diesen Anstieg seit mindestens 1971.

{2.3, 3.5, 9.6, Cross-Chapter Box 9.1, Box TS.4}

A.1.8 Veränderungen in der Biosphäre an Land seit 1970 stehen im Einklang mit der globalen Erwärmung: Klimazonen haben sich auf beiden Erdhalbkugeln polwärts verschoben, und die Vegetationsperiode hat sich seit den 1950er Jahren auf der Nordhalbkugel außerhalb der Tropen im Durchschnitt um bis zu zwei Tage pro Jahrzehnt verlängert (*hohes Vertrauen*).

{2.3, TS.2.6}

Human influence has warmed the climate at a rate that is unprecedented in at least the last 2000 years

Changes in global surface temperature relative to 1850–1900

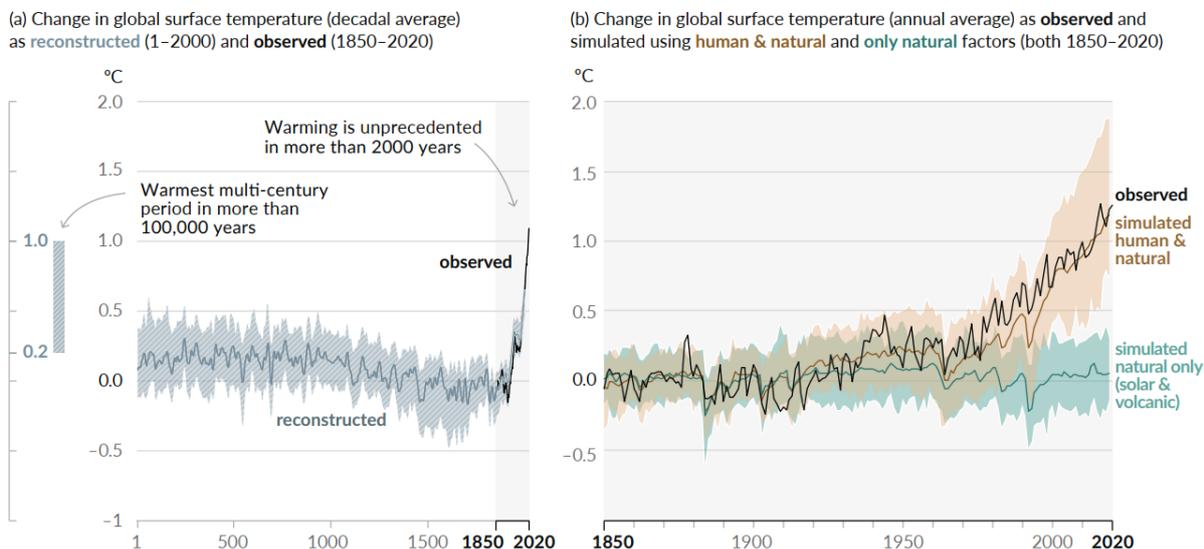


Abbildung SPM.1 | Geschichte der globalen Temperaturveränderung und Ursachen der jüngsten Erwärmung.

Tafel (a) Veränderungen der globalen Oberflächentemperatur, rekonstruiert aus paläoklimatischen Archiven (durchgezogene graue Linie, Jahre 1–2000) **und aus direkten Beobachtungen** (durchgezogene schwarze Linie, 1850–2020), jeweils gegenüber 1850–1900 und über das Jahrzehnt gemittelt. Der senkrechte Balken auf der linken Seite zeigt die geschätzte Temperatur (*sehr wahrscheinliche* Bandbreite) während des wärmsten mehrere Jahrhunderte langen Zeitraums in den letzten 100 000 Jahren, die vor etwa 6 500 Jahren während der aktuellen Warmzeit (Holozän) auftrat. Die Letzte Warmzeit vor etwa 125 000 Jahren ist der nächstjüngere Kandidat für einen Zeitraum mit höheren Temperaturen. Diese vergangenen Wärmephasen wurden durch langsame (mehrere Jahrtausende dauernde) Schwankungen der Erdumlaufbahn verursacht. Graue, weiß-schraffierte Flächen geben die *sehr wahrscheinlichen* Bandbreiten für die Temperaturrekonstruktionen an.

Tafel (b) Veränderungen der globalen Oberflächentemperatur in den letzten 170 Jahren (schwarze Linie) gegenüber 1850–1900 und pro Jahr gemittelt, im Vergleich zu Klimamodellsimulationen der Temperaturveränderung infolge von sowohl menschlichen als auch natürlichen Antriebsfaktoren (braun) und infolge von ausschließlich natürlichen Antriebsfaktoren (Sonnen- und Vulkanaktivität, grün) aus dem Gekoppelten Modellvergleichsprojekt Phase 6 (*Coupled Model Intercomparison Project Phase 6, CMIP6*) (siehe Box SPM.1). Durchgezogene farbige Linien zeigen den Durchschnitt über mehrere Modelle, farbige Flächen geben die *sehr wahrscheinliche* Bandbreite der Simulationen an. (Siehe Abbildung SPM.2 für bewertete Beiträge zur Erwärmung).

{2.3.1, Cross-Chapter Box 2.3, 3.3; TS.2.2; Cross-Section Box TS.1, Abbildung 1a}

Observed warming is driven by emissions from human activities, with greenhouse gas warming partly masked by aerosol cooling

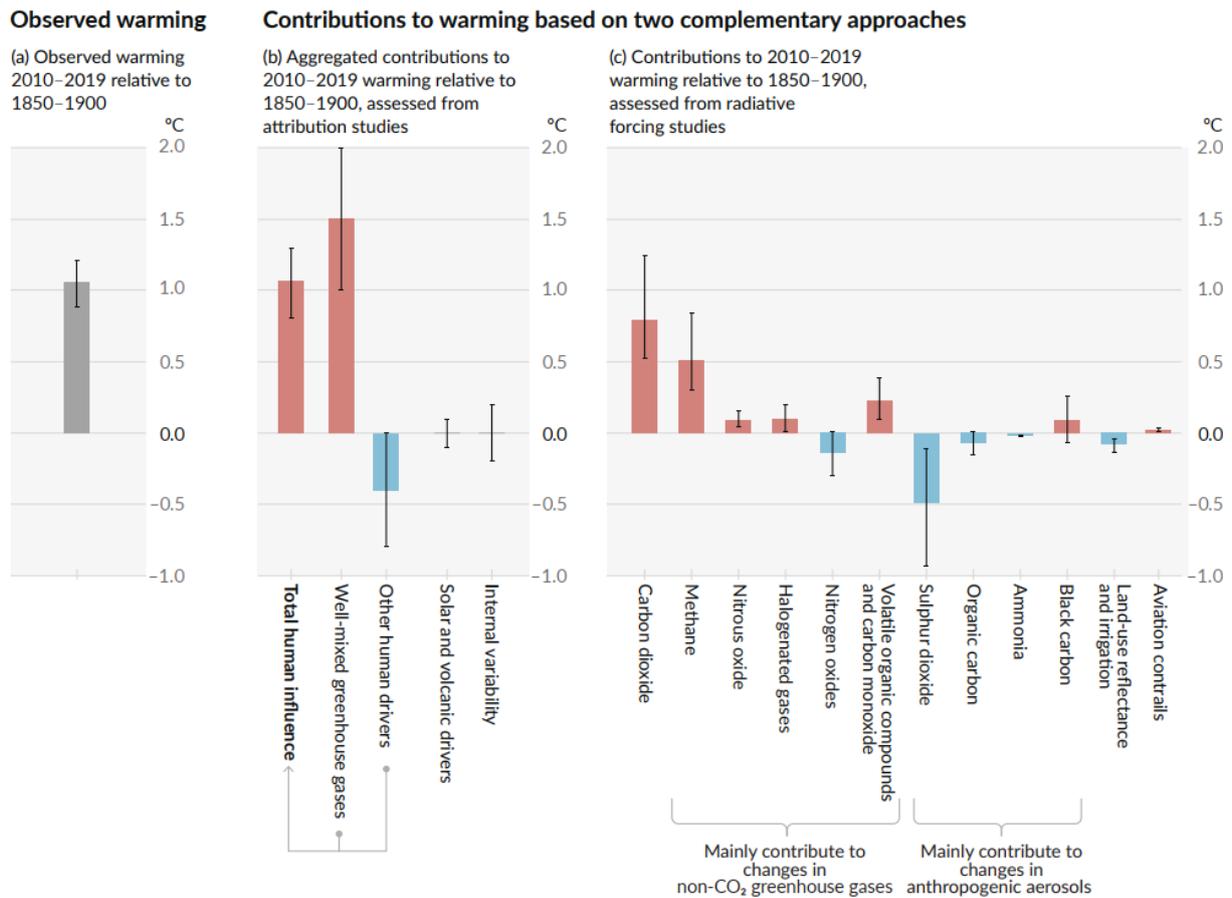


Abbildung SPM.2 | Bewertete Beiträge zur beobachteten Erwärmung in den Jahren 2010–2019 gegenüber 1850–1900

Tafel (a) Beobachtete globale Erwärmung (Anstieg der globalen Oberflächentemperatur). Die Antennen zeigen die *sehr wahrscheinliche* Bandbreite.

Tafel (b) Belege aus Zuordnungsstudien, die Information aus Klimamodellen und Beobachtungen zusammenfassen. Die Tafel zeigt Temperaturveränderungen, die folgenden Faktoren zugeordnet werden: dem gesamten Einfluss des Menschen, Konzentrationsänderungen von gut durchmischten Treibhausgasen, weiteren Einflüssen des Menschen aufgrund von Veränderungen bei Aerosolen, Ozon und Landnutzung (landnutzungsabhängige Reflektivität), solaren und vulkanischen Antriebsfaktoren sowie interner Klimavariabilität. Die Antennen geben die *wahrscheinlichen* Bandbreiten an.

Tafel (c) Belege aus der Bewertung des Strahlungsantriebs und der Klimasensitivität. Die Tafel zeigt Temperaturveränderungen durch einzelne Komponenten des menschlichen Einflusses: Emissionen von Treibhausgasen, Aerosolen und deren Vorläufern, Landnutzungsänderungen (landnutzungsabhängige Reflektivität und Bewässerung) sowie Kondensstreifen aus der Luftfahrt. Die Antennen geben die *sehr wahrscheinlichen* Bandbreiten an. Die Angaben berücksichtigen sowohl direkte Emissionen in die Atmosphäre als auch deren Auswirkung auf andere Antriebsfaktoren für Klimaänderung, sofern vorhanden. Für Aerosole werden sowohl direkte (durch Strahlung) als auch indirekte (durch Wechselwirkungen mit Wolken) Auswirkungen berücksichtigt.

{Cross-Chapter Box 2.3, 3.3.1, 6.4.2, 7.3}

A.2 Das Ausmaß der jüngsten Veränderungen im gesamten Klimasystem – und der gegenwärtige Zustand vieler Aspekte des Klimasystems – sind seit vielen Jahrhunderten bis Jahrtausenden beispiellos.

{2.2, 2.3, Cross-Chapter Box 2.1, 5.1} (Abbildung SPM.1)

A.2.1 Im Jahr 2019 waren die atmosphärischen CO₂-Konzentrationen so hoch wie seit mindestens 2 Millionen Jahren nicht mehr (*hohes Vertrauen*), und die Konzentrationen von CH₄ und N₂O waren so hoch wie seit mindestens 800 000 Jahren nicht mehr (*sehr hohes Vertrauen*). Seit 1750 übertreffen die Anstiege der CO₂- (47 %) und CH₄-Konzentrationen (156 %) bei weitem die natürlichen, über Jahrtausende ablaufenden Veränderungen zwischen Eis- und Warmzeiten der mindestens letzten 800 000 Jahre (*sehr hohes Vertrauen*), während der Anstieg von N₂O (23 %) diesen Veränderungen ähnlich ist.
{2.2, 5.1, TS.2.2}

A.2.2 Die globale Oberflächentemperatur ist seit 1970 schneller gestiegen als in jedem anderen 50-jährigen Zeitraum der mindestens letzten 2 000 Jahre (*hohes Vertrauen*). Die Temperaturen während des jüngsten Jahrzehnts (2011–2020) übersteigen die der jüngsten, mehrere Jahrhunderte andauernden Warmzeit vor etwa 6 500 Jahren¹³ [0,2 °C bis 1 °C gegenüber 1850–1900] (*mittleres Vertrauen*). Davor war die nächstjüngste Warmzeit vor etwa 125 000 Jahren, als die Temperatur Jahrhunderte lang in einem Bereich lag [0,5 °C bis 1,5 °C gegenüber 1850–1900], der sich mit den Beobachtungen des jüngsten Jahrzehnts überschneidet (*mittleres Vertrauen*).
{2.3, Cross-Chapter Box 2.1, Cross-Section Box TS.1} (Abbildung SPM.1)

A.2.3 Im Zeitraum 2011–2020 erreichte die durchschnittliche jährliche Meereisfläche in der Arktis den niedrigsten Stand seit mindestens 1850 (*hohes Vertrauen*). Die Meereisfläche in der Arktis im Spätsommer war kleiner als jemals zuvor in den letzten 1 000 Jahren (*mittleres Vertrauen*). Der globale Charakter des Gletscher-rückgangs seit den 1950er Jahren, bei dem sich fast alle Gletscher der Welt gleichzeitig zurückziehen, ist in mindesten den letzten 2 000 Jahren beispiellos (*mittleres Vertrauen*).
{2.3, TS.2.5}

A.2.4 Der mittlere globale Meeresspiegel ist seit 1900 schneller gestiegen als in jedem vorangegangenen Jahrhundert in mindestens den letzten 3 000 Jahren (*hohes Vertrauen*). Der globale Ozean hat sich im vergangenen Jahrhundert schneller erwärmt als seit dem Ende der letzten Eiszeit (vor etwa 11 000 Jahren) (*mittleres Vertrauen*). Im Verlauf der vergangenen 50 Millionen Jahre gab es einen langfristigen Anstieg des pH-Wertes im oberflächennahen offenen Ozean (*hohes Vertrauen*). Ein so niedriger pH-Wert im oberflächennahen offenen Ozean wie in den vergangenen Jahrzehnten ist jedoch ungewöhnlich für die vergangenen 2 Millionen Jahre (*mittleres Vertrauen*).
{2.3, TS.2.4, Box TS.4}

¹³ Wie in Abschnitt B.1 dargelegt, wird davon ausgegangen, dass die Temperaturen selbst bei dem sehr niedrigen Emissions-szenario SSP1-1.9 bis mindestens zum Jahr 2100 über den Temperaturen des vergangenen Jahrzehnts verbleiben und damit wärmer sein werden als in dem Jahrhunderte langen Zeitraum vor 6 500 Jahren.

- A.3 Der vom Menschen verursachte Klimawandel wirkt sich bereits auf viele Wetter- und Klimaextreme in allen Regionen der Welt aus. Seit dem Fünften Sachstandsbericht (AR5) gibt es stärkere Belege für beobachtete Veränderungen von Extremen wie Hitzewellen, Starkniederschlägen, Dürren und tropischen Wirbelstürmen sowie insbesondere für deren Zuordnung zum Einfluss des Menschen. {2.3, 3.3, 8.2, 8.3, 8.4, 8.5, 8.6, Box 8.1, Box 8.2, Box 9.2, 10.6, 11.2, 11.3, 11.4, 11.6, 11.7, 11.8, 11.9, 12.3} (Abbildung SPM.3)**
- A.3.1 Es ist *praktisch sicher*, dass Hitzeextreme (einschließlich Hitzewellen) in den meisten Regionen an Land seit den 1950er Jahren häufiger und intensiver geworden sind, während Kälteextreme (einschließlich Kälte- wellen) seltener und weniger schwerwiegend geworden sind, wobei *hohes Vertrauen* darin besteht, dass der vom Menschen verursachte Klimawandel der Hauptantriebsfaktor¹⁴ für diese Veränderungen ist. Manche der in den vergangenen zehn Jahren beobachteten jüngsten Hitzeextreme wären ohne Einfluss des Menschen auf das Klimasystem *äußerst unwahrscheinlich* gewesen. Marine Hitzewellen treten etwa doppelt so häufig auf wie in den 1980er Jahren (*hohes Vertrauen*), und der Einfluss des Menschen hat *sehr wahr- scheinlich* zu den meisten davon seit mindestens 2006 beigetragen. {Box 9.2, 11.2, 11.3, 11.9, TS.2.4, TS.2.6, Box TS.10} (Abbildung SPM.3)
- A.3.2 Die Häufigkeit und Intensität von Starkniederschlagsereignissen haben seit den 1950er Jahren über den meisten Landflächen zugenommen, für die Beobachtungsdaten für eine Trendanalyse ausreichen (*hohes Vertrauen*), und der vom Menschen verursachte Klimawandel ist *wahrscheinlich* der Hauptantriebsfaktor. Der vom Menschen verursachte Klimawandel hat in einigen Regionen zu Zunahmen von landwirtschaftli- chen und ökologischen Dürren¹⁵ beigetragen, was auf eine erhöhte Evapotranspiration¹⁶ aus Landsystemen zurückzuführen ist (*mittleres Vertrauen*). {8.2, 8.3, 11.4, 11.6, 11.9, TS.2.6, Box TS.10} (Abbildung SPM.3)
- A.3.3 Abnahmen der globalen Landmonsun-Niederschläge¹⁷ von den 1950er bis zu den 1980er Jahren werden teilweise den vom Menschen verursachten Aerosolemissionen auf der Nordhalbkugel zugeordnet, aber Zu- nahmen seither sind auf steigende Treibhausgaskonzentrationen und interne Schwankungen über einzelne bis mehrere Jahrzehnte zurückzuführen (*mittleres Vertrauen*). Über Südasien, Ostasien und Westafrika ha- ben vom Menschen verursachte Aerosolemissionen während des 20. Jahrhunderts eine Abkühlung bewirkt, wodurch die Monsun-Niederschläge abnahmen. Dies wirkte Zunahmen der Monsun-Niederschläge infolge der Erwärmung durch Treibhausgasemissionen entgegen (*hohes Vertrauen*). Zunahmen der

¹⁴ Wie in Fußnote 12 beschrieben bedeutet "Hauptantriebsfaktor" in dieser SPM, dass dieser für über 50 % der Veränderung verantwortlich ist.

¹⁵ Landwirtschaftliche und ökologische Dürre (je nach betroffenem Biom): ein Zeitraum mit anormalem Bodenfeuchtedefizit, das aus einer Kombination von Niederschlagsmangel und übermäßiger Evapotranspiration folgt und während der Vegetati- onsperiode die Anbauproduktion oder die Ökosystemfunktion im Allgemeinen beeinträchtigt (siehe Annex VII: Glossar). Be- obachtete Veränderungen bei meteorologischen Dürren (Niederschlagsdefizite) und hydrologischen Dürren (Abflussdefizite) unterscheiden sich von denen bei landwirtschaftlichen und ökologischen Dürren und werden im zugrundeliegenden AR6- Material (Kapitel 11) behandelt.

¹⁶ Summe aller Prozesse, durch die Wasser von offenen Wasser- und Eisflächen, unbedecktem Boden und Vegetation, die zusammen die Erdoberfläche ausmachen, an die Atmosphäre abgegeben wird (Glossar).

¹⁷ Der globale Monsun ist definiert als das Gebiet, in dem die jährliche Bandbreite (lokaler Sommer minus lokaler Winter) an Niederschlag größer ist als 2,5 mm pro Tag (Glossar). Globaler Landmonsun-Niederschlag bezieht sich auf den mittleren Niederschlag über Landgebieten innerhalb des globalen Monsuns.

westafrikanischen Monsun-Niederschläge seit den 1980er Jahren sind teilweise auf den zunehmenden Einfluss von Treibhausgasen und auf Verringerungen der kühlenden Wirkung der vom Menschen verursachten Aerosolemissionen über Europa und Nordamerika zurückzuführen (*mittleres Vertrauen*).

{2.3, 3.3, 8.2, 8.3, 8.4, 8.5, 8.6, Box 8.1, Box 8.2, 10.6, Box TS.13}

A.3.4 Es ist *wahrscheinlich*, dass der globale Anteil schwerer (Kategorie 3–5) tropischer Wirbelstürme in den letzten vier Jahrzehnten zugenommen hat, und es ist *sehr wahrscheinlich*, dass sich die geografische Breite, in der tropische Wirbelstürme im westlichen Nordpazifik ihre höchste Intensität erreichen, nach Norden verschoben hat. Diese Veränderungen können nicht durch interne Schwankungen allein erklärt werden (*mittleres Vertrauen*). Es besteht *geringes Vertrauen* in langfristige (mehrere Jahrzehnte bis Jahrhunderte umfassende) Trends in der Häufigkeit tropischer Wirbelstürme aller Kategorien. Studien zur Zuordnung von Ereignissen und das physikalische Verständnis deuten darauf hin, dass der vom Menschen verursachte Klimawandel die mit tropischen Wirbelstürmen verbundenen Starkniederschläge erhöht (*hohes Vertrauen*), aber aufgrund von eingeschränkter Datenverfügbarkeit sind vergangene Trends auf globaler Ebene nicht klar zu erkennen.

{8.2, 11.7, Box TS.10}

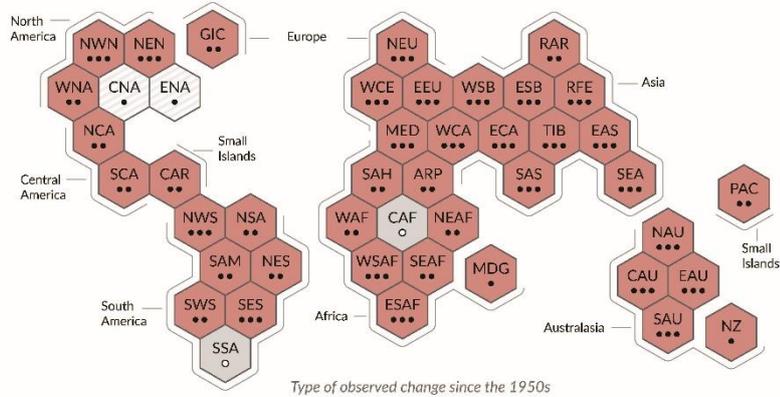
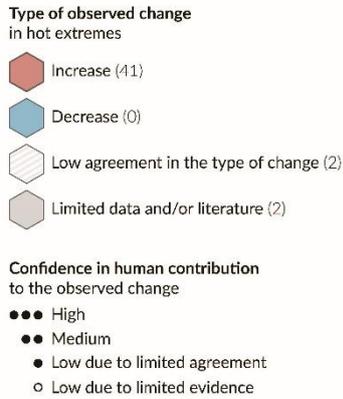
A.3.5 Der Einfluss des Menschen hat seit den 1950er Jahren die Eintrittswahrscheinlichkeit von zusammengesetzten Extremereignissen¹⁸ *wahrscheinlich* erhöht. Dazu gehören erhöhte Häufigkeiten von gleichzeitig auftretenden Hitzewellen und Dürren auf globaler Ebene (*hohes Vertrauen*), Feuerwetter in manchen Regionen aller bewohnten Kontinente (*mittleres Vertrauen*) und an manchen Orten Hochwasser, das durch gleichzeitiges Auftreten verschiedener Faktoren verursacht wird (*mittleres Vertrauen*).

{11.6, 11.7, 11.8, 12.3, 12.4, TS.2.6, Tabelle TS.5, Box TS.10}

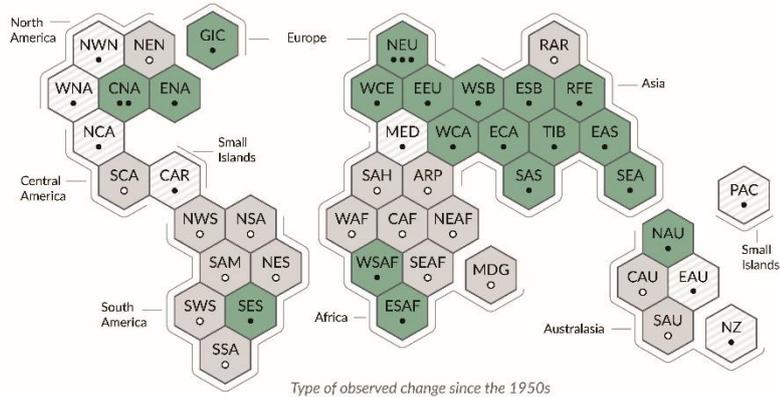
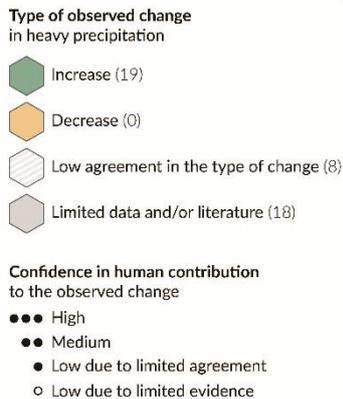
¹⁸ Zusammengesetzte Extremereignisse sind die Kombination mehrerer Antriebsfaktoren und/oder Gefahren, die zu einem gesellschaftlichen oder ökologischen Risiko beitragen. Beispiele dafür sind das Zusammentreffen von Hitzewellen und Dürren, Hochwasser, das durch gleichzeitiges Auftreten verschiedener Faktoren verursacht wird (z. B. eine Sturmflut in Kombination mit extremen Niederschlägen und/oder Abfluss), zusammengesetztes Feuerwetter (d. h. eine Kombination aus heißen, trockenen und windigen Bedingungen) oder das gleichzeitige Auftreten von Extremen an verschiedenen Orten.

Climate change is already affecting every inhabited region across the globe, with human influence contributing to many observed changes in weather and climate extremes

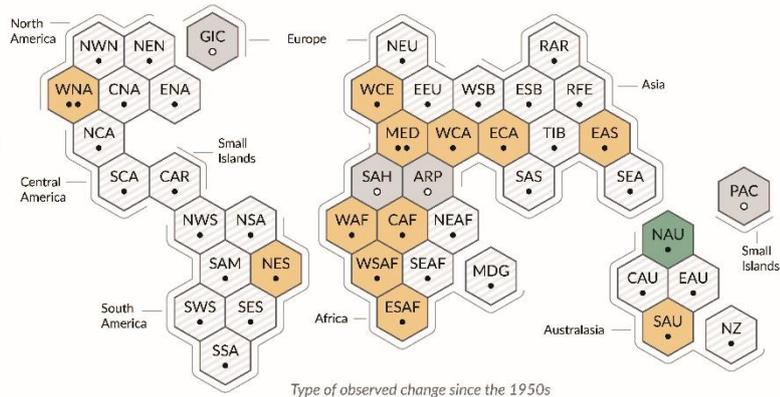
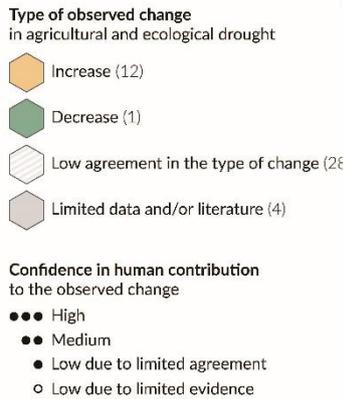
(a) Synthesis of assessment of observed change in **hot extremes** and confidence in human contribution to the observed changes in the world's regions



(b) Synthesis of assessment of observed change in **heavy precipitation** and confidence in human contribution to the observed changes in the world's regions



(c) Synthesis of assessment of observed change in **agricultural and ecological drought** and confidence in human contribution to the observed changes in the world's regions



Each hexagon corresponds to one of the IPCC AR6 WGI reference regions

North-Western North America

IPCC AR6 WGI reference regions: **North America:** NWN (North-Western North America), NEN (North-Eastern North America), WNA (Western North America), CNA (Central North America), ENA (Eastern North America), **Central America:** NCA (Northern Central America), SCA (Southern Central America), CAR (Caribbean), **South America:** NWS (North-Western South America), NSA (Northern South America), NES (North-Eastern South America), SAM (South American Monsoon), SWS (South-Western South America), SES (South-Eastern South America), SSA (Southern South America), **Europe:** GIC (Greenland/Iceland), NEU (Northern Europe), WCE (Western and Central Europe), EEU (Eastern Europe), MED (Mediterranean), **Africa:** MED (Mediterranean), SAH (Sahara), WAF (Western Africa), CAF (Central Africa), NEAF (North Eastern Africa), SEAF (South Eastern Africa), WSAF (West Southern Africa), ESAF (East Southern Africa), MDG (Madagascar), **Asia:** RAR (Russian Arctic), WSB (West Siberia), ESB (East Siberia), RFE (Russian Far East), WCA (West Central Asia), ECA (East Central Asia), TIB (Tibetan Plateau), EAS (East Asia), ARP (Arabian Peninsula), SAS (South Asia), SEA (South East Asia), **Australasia:** NAU (Northern Australia), CAU (Central Australia), EAU (Eastern Australia), SAU (Southern Australia), NZ (New Zealand), **Small Islands:** CAR (Caribbean), PAC (Pacific Small Islands)

Abbildung SPM.3 | Synthese bewerteter beobachteter und zuordenbarer regionaler Änderungen

Bewohnte Regionen im IPCC AR6 WGI werden als gleichgroße **Sechsecke** in ihrer ungefähren geografischen Lage dargestellt (regionale Akronyme siehe Legende). Alle Bewertungen gelten für jede Region als Ganzes und für die 1950er Jahre bis zur Gegenwart. Bewertungen, die auf anderen Zeitskalen oder kleinräumigeren Skalen vorgenommen wurden, können von den in der Abbildung gezeigten Werten abweichen. Die **Farben** in jeder Tafel stehen für die vier Bewertungsergebnisse hinsichtlich beobachteter Änderungen. Schraffierte Sechsecke (weiß und hellgrau) werden verwendet, wenn *geringe Übereinstimmung* über die Art der Änderung für die gesamte Region besteht; graue Sechsecke werden verwendet, wenn Daten und/oder Literatur in begrenztem Umfang verfügbar sind, was eine Bewertung der Region als Ganzes verhindert. Andere Farben stehen für mindestens *mittleres Vertrauen* in die beobachtete Änderung. Das **Vertrauensniveau** hinsichtlich des Einflusses des Menschen auf diese beobachteten Änderungen basiert auf der Bewertung von Literatur zur Trenderkennung und -zuordnung sowie zur Ereigniszuordnung und wird durch die Anzahl der Punkte angegeben: drei Punkte für *hohes Vertrauen*, zwei Punkte für *mittleres Vertrauen* und ein Punkt für *geringes Vertrauen* (einzelner gefüllter Punkt: begrenzte Übereinstimmung; einzelner ungefüllter Punkt: begrenzte Belege).

Tafel (a) Für Hitzeextreme stammen die Belege hauptsächlich aus Änderungen bei Messgrößen, die auf den täglichen Höchsttemperaturen basieren. Zusätzlich werden regionale Studien mit anderen Indizes (Dauer, Häufigkeit und Intensität von Hitzewellen) herangezogen. Rote Sechsecke kennzeichnen Regionen, in denen mindestens *mittleres Vertrauen* in eine beobachtete Zunahme von Hitzeextremen besteht.

Tafel (b) Für Starkniederschläge stammen die Belege hauptsächlich aus Änderungen bei Indizes auf der Grundlage von ein- oder fünftägigen Niederschlagsmengen unter Verwendung globaler und regionaler Studien. Grüne Sechsecke kennzeichnen Regionen, in denen mindestens *mittleres Vertrauen* in eine beobachtete Zunahme von Starkniederschlägen besteht.

Tafel (c) Landwirtschaftliche und ökologische Dürren werden anhand von beobachteten und simulierten Änderungen der Bodenfeuchte über die gesamte Profiltiefe bewertet, ergänzt durch Belege für Änderungen der Bodenfeuchte an der Oberfläche, der Wasserbilanz (Niederschlag minus Evapotranspiration) und von Indizes, die von Niederschlägen und atmosphärischem Verdunstungsbedarf abhängen. Gelbe Sechsecke kennzeichnen Regionen, in denen mindestens *mittleres Vertrauen* in eine beobachtete Zunahme dieser Art von Dürre besteht, und grüne Sechsecke kennzeichnen Regionen, in denen mindestens *mittleres Vertrauen* in einen beobachteten Rückgang landwirtschaftlicher und ökologischer Dürre besteht.

Tabelle TS.5 zeigt für alle Regionen eine größere Bandbreite an beobachteten Änderungen über die in dieser Abbildung dargestellten hinaus. Es ist zu beachten, dass das südliche Südamerika (*Southern South America*, SSA) die einzige Region ist, die keine beobachteten Änderungen bei den in dieser Abbildung gezeigten Messgrößen aufweist, aber von beobachteten Anstiegen der Durchschnittstemperatur, einem Rückgang von Frost und einer Zunahme von marinen Hitzewellen betroffen ist.

{11.9, Atlas 1.3.3, Abbildung Atlas.2, Tabelle TS.5, Box TS.10, Abbildung 1}

A.4 **Auf Basis von verbesserten Kenntnissen über Klimaprozesse, paläoklimatische Nachweise und die Reaktion des Klimasystems auf zunehmenden Strahlungsantrieb lässt sich die Gleichgewichtsklimasensitivität am besten mit 3 °C beziffern, wobei die Bandbreite im Vergleich zum AR5 eingegrenzt wurde.**

{2.2, 7.3, 7.4, 7.5, Box 7.2, Cross-Chapter Box 9.1, 9.4, 9.5, 9.6}

- A.4.1 Der vom Menschen verursachte Strahlungsantrieb von 2,72 [1,96 bis 3,48] Watt pro Quadratmeter im Jahr 2019 gegenüber 1750 hat das das Klimasystem erwärmt. Diese Erwärmung ist hauptsächlich auf erhöhte Treibhausgaskonzentrationen zurückzuführen und wird teilweise durch eine Abkühlung aufgrund erhöhter Aerosolkonzentrationen geschmälert. Der Strahlungsantrieb hat sich um 0,43 Watt pro Quadratmeter (19 %) gegenüber AR5 erhöht, wovon 0,34 Watt pro Quadratmeter auf den Anstieg der Treibhausgaskonzentrationen seit 2011 zurückzuführen sind. Der Rest ist zurückzuführen auf verbessertes wissenschaftliches Verständnis und auf geänderte Bewertung der Antriebsstärke von Aerosolen, wozu eine Konzentrationsabnahme und Verbesserungen bei der Berechnung zählen (*hohes Vertrauen*).
{2.2, 7.3, TS.2.2, TS.3.1}

- A.4.2 Der vom Menschen verursachte positive Nettostrahlungsantrieb führt zu einer Ansammlung zusätzlicher Energie (Erwärmung) im Klimasystem, die teilweise durch einen erhöhten Energieverlust an den Weltraum als Reaktion auf die Oberflächenerwärmung verringert wird. Die beobachtete durchschnittliche Erwärmungsrate des Klimasystems stieg von 0,50 [0,32 bis 0,69] Watt pro Quadratmeter für den Zeitraum 1971–2006¹⁹ auf 0,79 [0,52 bis 1,06] Watt pro Quadratmeter für den Zeitraum 2006–2018²⁰ (*hohes Vertrauen*). Von der Erwärmung des Klimasystems entfielen 91 % auf die Erwärmung des Ozeans, während jeweils etwa 5 %, 3 % und 1 % auf die Erwärmung von Landsystemen, Eisverlust und die Erwärmung der Atmosphäre entfielen (*hohes Vertrauen*).
{7.2, Box 7.2, TS.3.1}
- A.4.3 Die Erwärmung des Klimasystems hat durch Eisverlust an Land und durch thermische Ausdehnung aufgrund der Ozeanerwärmung zum Anstieg des mittleren globalen Meeresspiegels geführt. Thermische Ausdehnung erklärte 50 % des Meeresspiegelanstiegs im Zeitraum 1971–2018, während der Eisverlust aus Gletschern 22 %, der von Eisschilden 20 % und Änderungen der Wasserspeicherung an Land 8 % ausmachten. Die Verlustrate von Eisschilden nahm zwischen 1992–1999 und 2010–2019 um das Vierfache zu. Zusammengenommen trugen Eisschild- und Gletschermassenverluste am stärksten zum Anstieg des mittleren globalen Meeresspiegels im Zeitraum 2006–2018 bei. (*hohes Vertrauen*)
{9.4, 9.5, 9.6, Cross-Chapter Box 9.1}
- A.4.4 Die Gleichgewichtsklimasensitivität ist eine wichtige Größe, um abzuschätzen, wie das Klima auf Strahlungsantrieb reagiert. Auf der Grundlage von Belegen aus mehreren, unterschiedlichen Untersuchungsansätzen²¹ liegt die *sehr wahrscheinliche* Bandbreite der Gleichgewichtsklimasensitivität zwischen 2 °C (*hohes Vertrauen*) und 5 °C (*mittleres Vertrauen*). Der im AR6 ermittelte beste Schätzwert beträgt 3 °C mit einer *wahrscheinlichen* Bandbreite von 2,5 °C bis 4 °C (*hohes Vertrauen*) gegenüber 1,5 °C bis 4,5 °C im AR5, der keinen besten Schätzwert angegeben hat.
{7.4, 7.5, TS.3.2}

B. Mögliche Klimazukünfte

Ein Satz von fünf neuen illustrativen Emissionsszenarien wird in diesem Bericht durchgängig betrachtet, um die Klimaänderung in Reaktion auf ein breiteres Spektrum von Treibhausgas- (THG), Landnutzungs- und Luftverschmutzungszukünften zu untersuchen als im AR5 bewertet. Dieser Satz von Szenarien dient als Grundlage für Klimamodellprojektionen von Änderungen im Klimasystem. Diese Projektionen berücksichtigen Sonnenaktivität und Hintergrundantrieb durch Vulkane. Ergebnisse für das 21. Jahrhundert werden für die nahe Zukunft (2021–2040), mittelfristig (2041–2060) und langfristig (2081–2100) gegenüber 1850–1900 dargestellt, sofern nicht anders angegeben.

¹⁹ kumulativer Energiezuwachs von 282 [177 bis 387] ZJ im Zeitraum 1971–2006 (1 ZJ = 10²¹ Joules).

²⁰ kumulativer Energiezuwachs von 152 [100 bis 205] ZJ im Zeitraum 2006–2018.

²¹ Verständnis von Klimaprozessen, instrumentelle Aufzeichnungen, paläoklimatische Nachweisen und modellbasierte abgeleitete Eingrenzungen [emergent constraint] (siehe Glossar)

Box SPM.1 | Szenarien, Klimamodelle und Projektionen

Box SPM.1.1: In diesem Bericht wird die Reaktion des Klimas auf fünf illustrative Szenarien bewertet, die die in der Literatur beschriebene Bandbreite der möglichen zukünftigen Entwicklung anthropogener Antriebsfaktoren für den Klimawandel abdecken. Sie beginnen im Jahr 2015 und umfassen Szenarien²² mit hohen und sehr hohen Treibhausgasemissionen (SSP3-7.0 und SSP5-8.5) und CO₂-Emissionen, die sich bis 2100 bzw. 2050 gegenüber dem heutigen Stand in etwa verdoppeln, Szenarien mit mittleren Treibhausgasemissionen (SSP2-4.5) und CO₂-Emissionen, die bis Mitte des Jahrhunderts auf etwa dem heutigen Niveau verbleiben, sowie Szenarien mit sehr niedrigen und niedrigen Treibhausgasemissionen und CO₂-Emissionen, die um beziehungsweise nach 2050 auf netto Null zurückgehen, gefolgt von unterschiedlichen Niveaus an netto negativen CO₂-Emissionen²³ (SSP1-1.9 und SSP1-2.6), wie in Abbildung SPM.4 dargestellt. Emissionen unterscheiden sich in den Szenarien je nach sozioökonomischen Annahmen, nach Ausmaß von Minderungsmaßnahmen und – für Aerosole und Nicht-Methan-Ozon-Vorläufersubstanzen – Luftreinhaltungsmaßnahmen. Alternative Annahmen mögen zu ähnlichen Emissionen und Reaktionen des Klimas führen, die sozioökonomischen Annahmen sowie die Machbarkeit oder Wahrscheinlichkeit der einzelnen Szenarien sind jedoch nicht Teil dieser Bewertung.

{1.6, Cross-Chapter Box 1.4, TS.1.3} (Abbildung SPM.4)

Box SPM.1.2: In diesem Bericht werden die Ergebnisse von Klimamodellen bewertet, die an Phase 6 des Gekoppelten Modellvergleichsprojekts (*Coupled Model Intercomparison Project Phase 6, CMIP6*) des Weltklimaforschungsprogramms (*World Climate Research Programme*) teilnehmen. Diese Modelle enthalten neue und bessere Darstellungen von physikalischen, chemischen und biologischen Prozessen sowie eine höhere Auflösung im Vergleich zu den Klimamodellen, die in früheren IPCC-Sachstandsberichten berücksichtigt wurden. Dies hat die Simulation des jüngsten durchschnittlichen Zustands der meisten großräumigen Indikatoren des Klimawandels und vieler anderer Aspekte des Klimasystems verbessert. Einige Unterschiede zu Beobachtungen bleiben bestehen, zum Beispiel bei regionalen Niederschlagsmustern. Die in diesem Bericht bewerteten historischen CMIP6-Simulationen zeigen im Ensemble eine mittlere globale Oberflächentemperaturänderung, die über den Großteil des historischen Zeitraums höchstens 0,2 °C von Beobachtungsdaten abweicht, und die beobachtete Erwärmung liegt innerhalb der *sehr wahrscheinlichen* Bandbreite des CMIP6-Ensembles. Allerdings simulieren einige CMIP6-Modelle eine Erwärmung, die entweder über oder unter der als *sehr wahrscheinlich* bewerteten Bandbreite der beobachteten Erwärmung liegt. {1.5, Cross-Chapter Box 2.2, 3.3, 3.8, TS.1.2, Cross-Section Box TS.1} (Abbildung SPM.1 b, Abbildung SPM.2)

²² Im gesamten Bericht werden die fünf illustrativen Szenarien als SSPx-y bezeichnet, wobei sich "SSPx" auf den Gemeinsam Genutzten Sozioökonomischen Pfad oder "*Shared Socio-economic Pathway (SSP)*" bezieht, der die dem Szenario zugrundeliegenden sozioökonomischen Trends beschreibt, und "y" das ungefähre Niveau des Strahlungsantriebs (in Watt pro Quadratmeter) bezeichnet, der sich aus dem Szenario im Jahr 2100 ergibt. Ein detaillierter Vergleich mit den in früheren IPCC-Berichten verwendeten Szenarien wird in Abschnitt TS1.3 sowie den Abschnitten 1.6 und 4.6 vorgenommen. Die SSPs, die den spezifischen Antriebsszenarien für die Klimamodelle zugrunde liegen, werden von WGI nicht bewertet. Vielmehr gewährleistet die SSPx-y-Kennzeichnung die Nachvollziehbarkeit in der zugrundeliegenden Literatur, in der bestimmte Pfade von Antriebsfaktoren als Input für die Klimamodelle verwendet werden. Das IPCC ist neutral in Bezug auf die Annahmen, die den SSPs zugrunde liegen, die nicht alle möglichen Szenarien abdecken. Alternative Szenarien können in Betracht gezogen oder entwickelt werden.

²³ Netto negative CO₂-Emissionen werden erreicht, wenn anthropogene Entnahmen von CO₂ die anthropogenen Emissionen übersteigen {Glossar}.

Box SPM.1 (Fortsetzung)

Box SPM.1.3: Die in diesem Bericht betrachteten CMIP6-Modelle weisen eine größere Bandbreite für die Klimasensitivität auf als die CMIP5-Modelle und als die im AR6 bewertete *sehr wahrscheinliche* Bandbreite, die sich auf Belege aus mehreren, unterschiedlichen Untersuchungsansätzen stützt. Diese CMIP6-Modelle zeigen auch eine höhere durchschnittliche Klimasensitivität als CMIP5 und als der beste Schätzwert im AR6. Die höheren CMIP6-Klimasensitivitätswerte im Vergleich zu CMIP5 lassen sich auf eine verstärkende Wolkenrückkopplung zurückführen, die in CMIP6 um etwa 20 % größer ist.

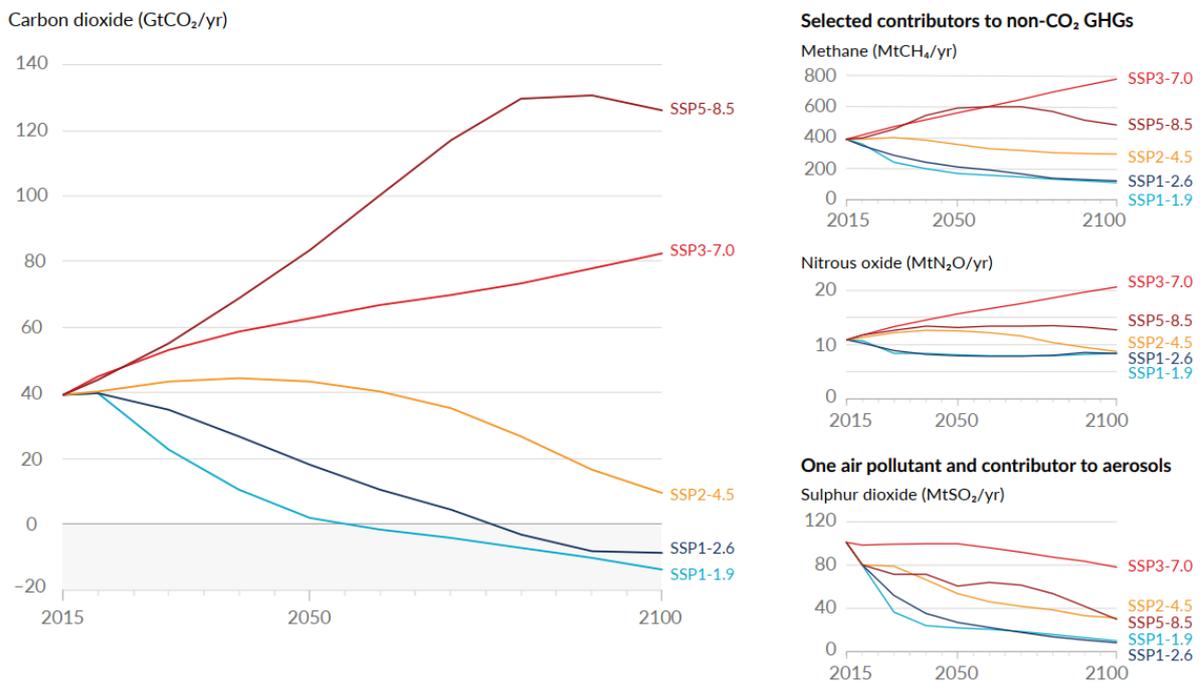
{Box 7.1, 7.3, 7.4, 7.5, TS.3.2}

Box SPM.1.4: Zum ersten Mal in einem IPCC-Bericht werden die bewerteten zukünftigen Änderungen der globalen Oberflächentemperatur, der Ozeanerwärmung und des Meeresspiegels ermittelt, indem Multi-Modell-Projektionen mit beobachtungsbasierten Eingrenzungen, die auf der simulierten vergangenen Erwärmung beruhen, sowie mit der AR6-Bewertung der Klimasensitivität kombiniert werden. Für andere Größen gibt es noch keine derartigen robusten Methoden, um die Projektionen einzugrenzen. Dennoch können für ein bestimmtes Niveau an globaler Erwärmung in Projektionen robuste geografische Muster für viele Variablen ermittelt werden; diese sind für alle betrachteten Szenarien gleich und unabhängig vom Zeitpunkt des Erreichens des globalen Erwärmungsniveaus.

{1.6, 4.3, 4.6, Box 4.1, 7.5, 9.2, 9.6, Cross-Chapter Box 11.1, Cross-Section Box TS.1}

Future emissions cause future additional warming, with total warming dominated by past and future CO₂ emissions

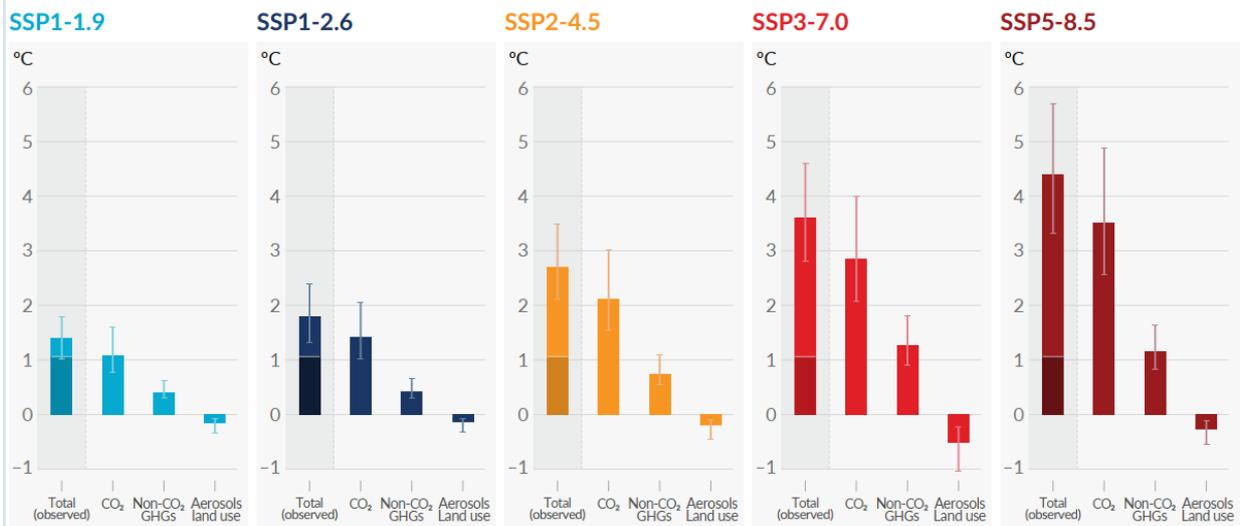
(a) Future annual emissions of CO₂ (left) and of a subset of key non-CO₂ drivers (right), across five illustrative scenarios



Box SPM.1 (Fortsetzung)

(b) Contribution to global surface temperature increase from different emissions, with a dominant role of CO₂ emissions

Change in global surface temperature in 2081–2100 relative to 1850–1900 (°C)



Total warming (observed warming to date in darker shade), warming from CO₂, warming from non-CO₂ GHGs and cooling from changes in aerosols and land use

Abbildung SPM.4 | Künftige anthropogene Emissionen der wichtigsten Antriebsfaktoren des Klimawandels und Erwärmungsbeiträge nach Gruppen von Antriebsfaktoren für die fünf in diesem Bericht verwendeten illustrativen Szenarien.

Die fünf Szenarien sind SSP1-1.9, SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 und SSP5-8.5.

Tafel (a) Jährliche anthropogene (vom Menschen verursachte) Emissionen im Zeitraum 2015–2100. Dargestellt sind Emissionsverläufe für Kohlendioxid (CO₂) aus allen Sektoren (Gt CO₂/Jahr) (linkes Diagramm) und für eine Auswahl von drei wichtigen Nicht-CO₂-Antriebsfaktoren, die in den Szenarien berücksichtigt werden: Methan (CH₄, Mt CH₄/Jahr, oberes rechtes Diagramm), Lachgas (N₂O, Mt N₂O/Jahr, mittleres rechtes Diagramm) und Schwefeldioxid (SO₂, Mt SO₂/Jahr, unteres rechtes Diagramm, trägt zu anthropogenen Aerosolen in Tafel (b) bei).

Tafel (b) Beiträge zur Erwärmung nach Gruppen von anthropogenen Antriebsfaktoren und nach Szenario dargestellt als Änderung der globalen Oberflächentemperatur (°C) im Zeitraum 2081–2100 gegenüber 1850–1900, mit Angabe der bisher beobachteten Erwärmung. Balken und Antennen stellen den Medianwert bzw. die *sehr wahrscheinliche* Bandbreite dar. Innerhalb jedes Szenariodiagramms stellen die Balken die gesamte globale Erwärmung (°C; Balken „Gesamt“) (siehe Tabelle SPM.1) sowie die Beiträge zur Erwärmung (°C) von CO₂-Änderungen (Balken „CO₂“), von Nicht-CO₂-Treibhausgasen (Balken „Nicht-CO₂-THG“, bestehend aus gut durchmischten Treibhausgasen und Ozon) und der Nettoabkühlung durch andere anthropogene Antriebsfaktoren (Balken „Aerosole und Landnutzung“, anthropogene Aerosole, Änderungen der Reflexion aufgrund von Landnutzungs- und Bewässerungsänderungen sowie Kondensstreifen aus der Luftfahrt) (bisherige Beiträge der einzelnen Faktoren zur Erwärmung siehe Abbildung SPM.2, Tafel c). Der beste Schätzwert für die beobachtete Erwärmung in den Jahren 2010–2019 gegenüber 1850–1900 (siehe Abbildung SPM.2, Tafel a) ist mit dem dunkleren Teil im Balken „Gesamt“ angegeben. Die Beiträge zur Erwärmung in Tafel (b) werden berechnet wie in Tabelle SPM.1 für den Balken „Gesamt“ erläutert. Für die anderen Balken werden die Beiträge von Gruppen von Antriebsfaktoren mit einem physikalischen Klimaemulator der globalen Oberflächentemperatur berechnet, der auf Bewertungen der Klimasensitivität und des Strahlungsantriebs beruht.

{Cross-Chapter Box 1.4, 4.6, Abbildung 4.35, 6.7, Abbildung 6.18, 6.22 und 6.24, Cross-Chapter Box 7.1, 7.3, Abbildung 7.7, Box TS.7, Abbildungen TS.4 und TS.15}

B.1 Die globale Oberflächentemperatur wird bei allen betrachteten Emissionsszenarien bis mindestens Mitte des Jahrhunderts weiter ansteigen. Eine globale Erwärmung von 1,5 °C und 2 °C wird im Laufe des 21. Jahrhunderts überschritten werden, es sei denn, es erfolgen in den kommenden Jahrzehnten drastische Reduktionen der CO₂- und anderer Treibhausgasemissionen.

{2.3, Cross-Chapter Box 2.3, Cross-Chapter Box 2.4, 4.3, 4.4, 4.5} (Abbildung SPM.1, Abbildung SPM.4, Abbildung SPM.8, Tabelle SPM.1, Box SPM.1)

B.1.1 Die globale Oberflächentemperatur wird im Durchschnitt der Jahre 2081–2100 *sehr wahrscheinlich* beim betrachteten Szenario mit sehr niedrigen Treibhausgasemissionen (SSP1-1.9) um 1,0 °C bis 1,8 °C, beim mittleren Szenario (SSP2-4.5) um 2,1 °C bis 3,5 °C und beim Szenario mit sehr hohen Treibhausgasemissionen (SSP5-8.5) um 3,3 °C bis 5,7 °C höher liegen als 1850–1900²⁴. Das letzte Mal, dass die globale Oberflächentemperatur dauerhaft um 2,5 °C oder mehr höher lag als 1850–1900, war vor über 3 Millionen Jahren (*mittleres Vertrauen*).

{2.3, Cross-Chapter Box 2.4, 4.3, 4.5, Box TS.2, Box TS.4, Cross-Section Box TS.1} (Tabelle SPM.1)

Tabelle SPM.1 | Änderungen der globalen Oberflächentemperatur, bewertet auf der Grundlage von Belegen aus mehreren, unterschiedlichen Untersuchungsansätzen für ausgewählte 20-Jahres-Zeiträume und die fünf betrachteten illustrierten Emissionsszenarien. Temperaturunterschiede gegenüber der durchschnittlichen globalen Oberflächentemperatur im Zeitraum 1850–1900 werden in °C angegeben. Dies schließt die revidierte Bewertung der beobachteten historischen Erwärmung für den AR5-Referenzzeitraum 1986–2005 mit ein, die im AR6 um 0,08 [-0,01 bis 0,12] °C höher ist als im AR5 (siehe Fußnote 10). Änderungen gegenüber dem jüngsten Referenzzeitraum 1995–2014 lassen sich durch Subtraktion von 0,85 °C, dem besten Schätzwert für die beobachtete Erwärmung von 1850–1900 bis 1995–2014, näherungsweise berechnen.

{Cross-Chapter Box 2.3, 4.3, 4.4, Cross-Section Box TS.1}

Szenario	Nahe Zukunft (2021–2040)		Mittelfristig, 2041–2060		Langfristig, 2081–2100	
	Bester Schätzwert (°C)	Sehr wahrscheinliche Bandbreite (°C)	Bester Schätzwert (°C)	Sehr wahrscheinliche Bandbreite (°C)	Bester Schätzwert (°C)	Sehr wahrscheinliche Bandbreite (°C)
SSP1-1.9	1,5	1,2 bis 1,7	1,6	1,2 bis 2,0	1,4	1,0 bis 1,8
SSP1-2.6	1,5	1,2 bis 1,8	1,7	1,3 bis 2,2	1,8	1,3 bis 2,4
SSP2-4.5	1,5	1,2 bis 1,8	2,0	1,6 bis 2,5	2,7	2,1 bis 3,5
SSP3-7.0	1,5	1,2 bis 1,8	2,1	1,7 bis 2,6	3,6	2,8 bis 4,6
SSP5-8.5	1,6	1,3 bis 1,9	2,4	1,9 bis 3,0	4,4	3,3 bis 5,7

B.1.2 Basierend auf der Bewertung von Belegen aus mehreren, unterschiedlichen Untersuchungsansätzen würde bei den in diesem Bericht betrachteten Szenarien mit hohen und sehr hohen Treibhausgasemissionen (SSP3-7.0 beziehungsweise SSP5-8.5) eine globale Erwärmung von 2 °C gegenüber 1850–1900 im 21. Jahrhundert überschritten werden. Eine globale Erwärmung von 2 °C würde im mittleren Szenario (SSP2-4.5) *äußerst wahrscheinlich* überschritten werden. Bei den Szenarien mit sehr niedrigen und niedrigen

²⁴ Änderungen der globalen Oberflächentemperatur werden als laufende 20-Jahres-Durchschnitte angegeben, sofern nicht anders angegeben.

Treibhausgasemissionen ist es *äußerst unwahrscheinlich* (SSP1-1.9) beziehungsweise *unwahrscheinlich* (SSP1-2.6), dass eine globale Erwärmung von 2 °C überschritten wird²⁵. Ein mittelfristiges (2041–2060) Überschreiten von 2 °C globaler Erwärmung ist beim Szenario mit sehr hohen Treibhausgasemissionen (SSP5-8.5) *sehr wahrscheinlich*, beim Szenario mit hohen Treibhausgasemissionen (SSP3-7.0) *wahrscheinlich* und beim mittleren Treibhausgasemissionsszenario (SSP2-4.5) *eher wahrscheinlich als nicht*²⁶. {4.3, Cross-Section Box TS.1} (Tabelle SPM.1, Abbildung SPM.4, Box SPM.1)

B.1.3 Eine globale Erwärmung von 1,5 °C gegenüber 1850–1900 würde bei den in diesem Bericht betrachteten mittleren, hohen und sehr hohen Treibhausgasszenarien (SSP2-4.5, SSP3-7.0 bzw. SSP5-8.5) im Laufe des 21. Jahrhunderts überschritten werden. Bei den fünf illustrativen Szenarien wird das Niveau von 1,5 °C globaler Erwärmung in naher Zukunft (2021–2040) bei dem Szenario mit sehr hohen Treibhausgasemissionen (SSP5-8.5) *sehr wahrscheinlich*, bei den Szenarien mit mittleren und hohen Treibhausgasemissionen (SSP2-4.5 und SSP3-7.0) *wahrscheinlich* und bei dem Szenario mit niedrigen Treibhausgasemissionen (SSP1-2.6) *eher wahrscheinlich als nicht* überschritten und beim Szenario mit sehr niedrigen Treibhausgasemissionen (SSP1-1.9) *eher wahrscheinlich als nicht* erreicht²⁷. Darüber hinaus ist es beim Szenario mit sehr niedrigen Treibhausgasemissionen (SSP1-1.9) *eher wahrscheinlich als nicht*, dass die globale Oberflächentemperatur gegen Ende des 21. Jahrhunderts wieder auf unter 1,5 °C sänke, wobei eine vorübergehende Überschreitung von 1,5 °C globaler Erwärmung nicht mehr als 0,1 °C betrüge. {4.3, Cross-Section Box TS.1} (Tabelle SPM.1, Abbildung SPM.4)

B.1.4 Die globale Oberflächentemperatur kann aufgrund einer erheblichen natürlichen Variabilität in jedem beliebigen Jahr von dem langfristigen, vom Menschen verursachten Trend nach oben oder unten abweichen²⁸. Das Auftreten einzelner Jahre mit einer globalen Oberflächentemperatur über einem bestimmten Wert, z. B.

²⁵ SSP1-1.9 und SSP1-2.6 sind Szenarien, die im Jahr 2015 beginnen und sehr niedrige beziehungsweise niedrige Treibhausgasemissionen aufweisen sowie CO₂-Emissionen, welche um das Jahr 2050 oder danach auf netto Null absinken, gefolgt von unterschiedlichen Niveaus an netto negativen CO₂-Emissionen.

²⁶ Als Überschreiten wird hier definiert, dass die bewertete globale Oberflächentemperaturänderung, gemittelt über einen Zeitraum von 20 Jahren, ein bestimmtes Niveau an globaler Erwärmung überschreitet.

²⁷ Die Bewertung im AR6 darüber, wann ein bestimmtes globales Erwärmungsniveau erstmals überschritten wird, profitiert von der Berücksichtigung der illustrativen Szenarien, davon, dass Belege aus mehreren, unterschiedlichen Untersuchungsansätzen in die Bewertung der künftigen Reaktion der globalen Oberflächentemperatur auf Strahlungsantrieb einfließen, und von der verbesserten Bezifferung der historischen Erwärmung. Die Bewertung im AR6 ist daher nicht direkt mit der SR1.5-SPM vergleichbar, in der ein *wahrscheinliches* Erreichen einer globalen Erwärmung von 1,5 °C zwischen 2030 und 2052 angegeben war, und zwar auf Grundlage einer einfachen linearen Extrapolation der Erwärmungsraten der jüngsten Vergangenheit. Zieht man statt einer linearen Extrapolation Szenarien ähnlich wie SSP1-1.9 in Betracht, kommt die SR1.5-Angabe, wann die globale Erwärmung von 1,5 °C erstmals überschritten wird, dem hier angegebenen besten Schätzwert nahe.

²⁸ Als natürliche Variabilität werden Klimaschwankungen bezeichnet, die ohne jeglichen Einfluss des Menschen auftreten, d. h. eine interne Variabilität in Kombination mit der Reaktion auf externe natürliche Faktoren wie Vulkanausbrüche, Veränderungen der Sonnenaktivität und, über längere Zeiträume, Effekte der Erdumlaufbahn und Plattentektonik (Glossar).

1,5 °C oder 2 °C gegenüber 1850–1900, bedeutet nicht, dass dieses Niveau an globaler Erwärmung erreicht wurde²⁹.

{Cross-Chapter Box 2.3, 4.3, 4.4, Box 4.1, Cross-Section Box TS.1} (Tabelle SPM.1, Abbildung SPM.1, Abbildung SPM.8)

B.2 Viele Veränderungen im Klimasystem werden in unmittelbarem Zusammenhang mit der zunehmenden globalen Erwärmung größer. Dazu gehören die Zunahme der Häufigkeit und Intensität von Hitzeextremen, marinen Hitzewellen und Starkniederschlägen sowie in einigen Regionen von landwirtschaftlichen und ökologischen Dürren, eine Zunahme des Anteils heftiger tropischer Wirbelstürme sowie Rückgänge des arktischen Meereises, von Schneebedeckung und Permafrost.

{4.3, 4.5, 4.6, 7.4, 8.2, 8.4, Box 8.2, 9.3, 9.5, Box 9.2, 11.1, 11.2, 11.3, 11.4, 11.6, 11.7, 11.9, Cross-Chapter Box 11.1, 12.4, 12.5, Cross-Chapter Box 12.1, Atlas.4, Atlas.5, Atlas.6, Atlas.7, Atlas.8, Atlas.9, Atlas.10, Atlas.11} (Abbildung SPM.5, Abbildung SPM.6, Abbildung SPM.8)

B.2.1 Es ist *praktisch sicher*, dass sich die Landoberfläche weiterhin stärker erwärmen wird als die Meeresoberfläche (*wahrscheinlich* 1,4 bis 1,7 Mal stärker). Es ist *praktisch sicher*, dass sich die Arktis weiterhin stärker erwärmen wird als die globale Oberflächentemperatur, und zwar mit *hoher Wahrscheinlichkeit* um mehr als das Zweifache der globalen Erwärmungsgeschwindigkeit.

{2.3, 4.3, 4.5, 4.6, 7.4, 11.1, 11.3, 11.9, 12.4, 12.5, Cross-Chapter Box 12.1, Atlas.4, Atlas.5, Atlas.6, Atlas.7, Atlas.8, Atlas.9, Atlas.10, Atlas.11, Cross-Section Box TS.1, TS.2.6} (Abbildung SPM.5)

B.2.2 Mit jedem weiteren Zuwachs an globaler Erwärmung werden Änderungen von Extremen weiterhin größer. Zum Beispiel führt jedes zusätzliche 0,5 °C globaler Erwärmung zu deutlich erkennbaren Zunahmen der Intensität und Häufigkeit von Hitzeextremen, einschließlich Hitzewellen (*sehr wahrscheinlich*), und Starkniederschlägen (*hohes Vertrauen*) sowie landwirtschaftlichen und ökologischen Dürren³⁰ in manchen Regionen (*hohes Vertrauen*). Erkennbare Änderungen der Intensität und Häufigkeit meteorologischer Dürren sind in manchen Regionen für jedes zusätzliche 0,5 °C globaler Erwärmung zu verzeichnen (*mittleres Vertrauen*), wobei mehr Regionen Zunahmen als Abnahmen aufweisen. Zunahmen von Häufigkeit und Intensität hydrologischer Dürren werden mit zunehmender globaler Erwärmung in manchen Regionen größer (*mittleres Vertrauen*). Manche Extremereignisse, die in Beobachtungsdaten noch nie verzeichnet wurden, werden bei zusätzlicher globaler Erwärmung häufiger auftreten, selbst bei globaler Erwärmung von 1,5 °C. Die prozentualen Häufigkeitsänderungen sind laut Projektionen bei selteneren Ereignissen höher (*hohes Vertrauen*). {8.2, 11.2, 11.3, 11.4, 11.6, 11.9, Cross-Chapter Box 11.1, Cross-Chapter Box 12.1, TS.2.6} (Abbildung SPM.5, Abbildung SPM.6)

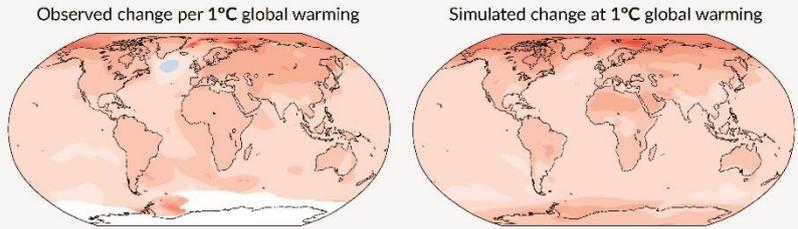
²⁹ Die interne Variabilität in jedem beliebigen Jahr wird mit $\pm 0,25$ °C beziffert (5–95 % Bandbreite, *hohes Vertrauen*).

³⁰ Projizierte Änderungen von landwirtschaftlichen und ökologischen Dürren werden in erster Linie auf der Grundlage der Bodenfeuchte über die gesamte Profiltiefe bewertet. Definition und Beziehung zu Niederschlag und Evapotranspiration siehe Fußnote 15.

With every increment of global warming, changes get larger in regional mean temperature, precipitation and soil moisture

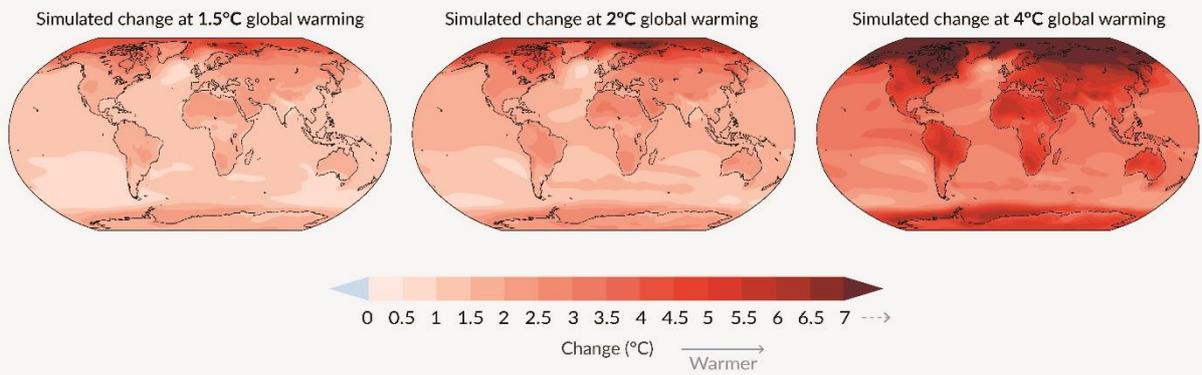
(a) Annual mean temperature change (°C) at 1°C global warming

Warming at 1°C affects all continents and is generally larger over land than over the oceans in both observations and models. Across most regions, observed and simulated patterns are consistent.



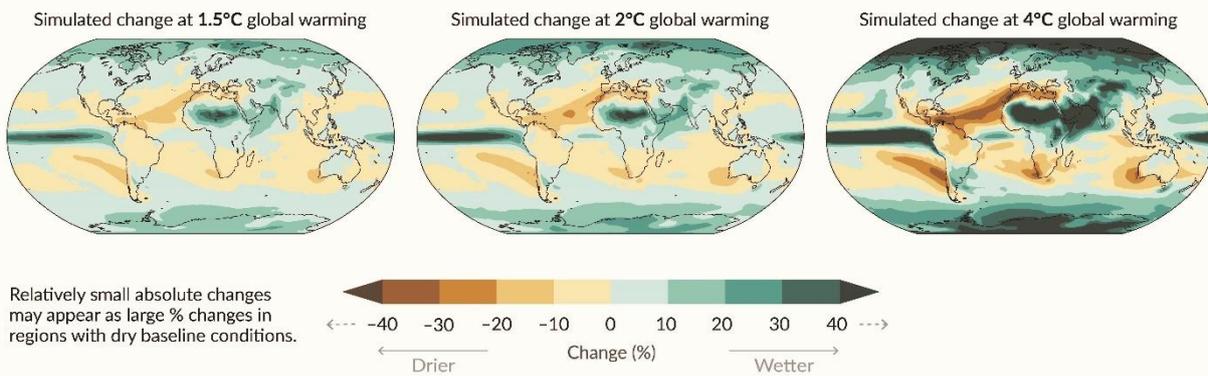
(b) Annual mean temperature change (°C) relative to 1850–1900

Across warming levels, land areas warm more than ocean areas, and the Arctic and Antarctica warm more than the tropics.



(c) Annual mean precipitation change (%) relative to 1850–1900

Precipitation is projected to increase over high latitudes, the equatorial Pacific and parts of the monsoon regions, but decrease over parts of the subtropics and in limited areas of the tropics.



Relatively small absolute changes may appear as large % changes in regions with dry baseline conditions.

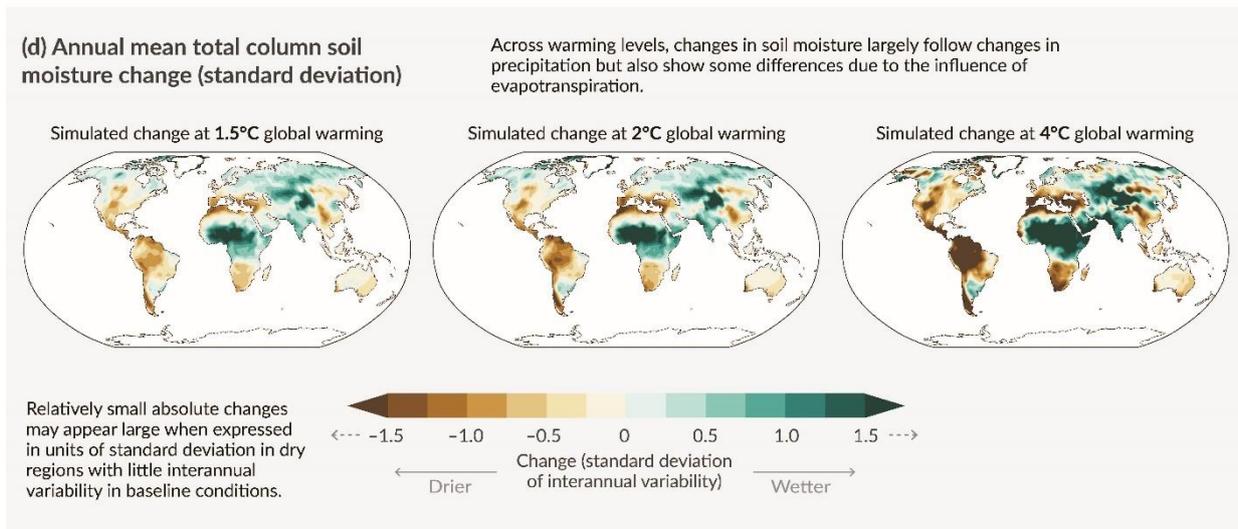


Abbildung SPM.5 | Änderungen von mittlerer jährlicher Oberflächentemperatur, Niederschlag und Bodenfeuchte.

Tafel (a) Vergleich der beobachteten und der simulierten Änderung der mittleren jährlichen Oberflächentemperatur. Die **linke Karte** zeigt die beobachteten Änderungen der mittleren jährlichen Oberflächentemperatur im Zeitraum 1850–2020 pro °C globaler Erwärmung (°C). Die lokalen (d. h. pro Gitterpunkt) beobachteten mittleren jährlichen Oberflächentemperaturänderungen sind linear gegen die globale Oberflächentemperatur im Zeitraum 1850–2020 regressiert. Die beobachteten Temperaturdaten stammen von Berkeley Earth, dem Datensatz mit der größten Abdeckung und der höchsten horizontalen Auflösung. Die lineare Regression ist auf alle Jahre angewendet, für die Daten für den entsprechenden Gitterpunkt verfügbar sind. Die Regressionsmethode wurde verwendet, um die gesamte Beobachtungszeitreihe zu berücksichtigen und dadurch die Rolle interner Variabilität auf der Gitterpunktebene zu reduzieren. Weiß kennzeichnet Bereiche, in denen die zeitliche Abdeckung 100 Jahre oder weniger betrug und damit zu kurz war, um eine zuverlässige lineare Regression zu berechnen. Die **rechte Karte** basiert auf Modellsimulationen und zeigt die Änderung der jährlichen, über mehrere Modelle gemittelten Jahrestemperaturen bei einer globalen Erwärmung von 1 °C (20-jährige mittlere globale Oberflächentemperaturänderung gegenüber 1850–1900). Die Dreiecke an beiden Enden des Farbbalkens zeigen Ausreißer an, d. h. Werte, die über- oder unterhalb der angegebenen Grenzwerte liegen.

Tafel (b) Simulierte mittlere jährliche Temperaturänderung (°C), Tafel (c) Niederschlagsänderung (%) und Tafel (d) Änderung der Bodenfeuchte über die gesamte Profiltiefe (Standardabweichung der interannuellen Variabilität) bei einer globalen Erwärmung von 1,5 °C, 2 °C und 4 °C (20-Jahres-Mittelwert der globalen Oberflächentemperaturänderung gegenüber 1850–1900). Simulierte Änderungen entsprechen der Änderung des Multi-Modell-Mittelwertes aus dem Gekoppelten Modellvergleichsprojekt Phase 6 (*Coupled Model Intercomparison Project Phase 6, CMIP6*) (mediane Änderung der Bodenfeuchte) auf dem entsprechenden Erwärmungsniveau, d. h. dieselbe Methode wie für die rechte Karte in Tafel (a).

In **Tafel (c)** können hohe positive prozentuale Änderungen in trockenen Regionen geringen absoluten Änderungen entsprechen. In **Tafel (d)** wird als Einheit die Standardabweichung der Jahr-zu-Jahr-Variabilität der Bodenfeuchte im Zeitraum 1850–1900 angegeben. Die Standardabweichung ist eine weit verbreitete Maßeinheit für die Beschreibung des Ausmaßes von Dürren. Ein projizierter Rückgang der mittleren Bodenfeuchte um eine Standardabweichung entspricht Bodenfeuchtebedingungen, die für Dürren typisch sind, die im Zeitraum 1850–1900 etwa einmal alle sechs Jahre auftraten. In Tafel (d) können große Änderungen in trockenen Regionen mit geringer Jahr-zu-Jahr-Variabilität der Referenzbedingungen kleinen absoluten Änderungen entsprechen. Die Dreiecke an beiden Enden der Farbbalkens zeigen Ausreißer an, d. h. Werte, die über- oder unterhalb der angegebenen Grenzwerte liegen. Die Ergebnisse aller Modelle, die das entsprechende Erwärmungsniveau in einem der fünf illustrativen Szenarien (SSP1-1.9, SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 und SSP5-8.5) erreichen, wurden gemittelt. Karten mit Änderungen der Jahresmitteltemperatur und des Niederschlags bei einer globalen Erwärmung von 3 °C siehe Abbildung 4.31 und Abbildung 4.32 in Abschnitt 4.6. Entsprechende Karten für Tafeln (b), (c) und (d) – inklusive Schraffur, die den Grad der Modellübereinstimmung auf Gitterzellenebene angibt – sind in den Abbildungen 4.31, 4.32 beziehungsweise 11.19 zu finden; wie in CC-Box Atlas.1 hervorgehoben, ist die Schraffur auf Gitterzellenebene für größere räumliche Maßstäbe (z. B. über AR6-Referenzregionen) nicht informativ, da dort die aggregierten Signale weniger von kleinräumigen Schwankungen beeinflusst werden, was zu einer größeren Robustheit führt.

{Abbildung 1.14, 4.6.1, Cross-Chapter Box 11.1, Cross-Chapter Box Atlas.1, TS.1.3.2, Abbildungen TS.3 und TS.5}

Projected changes in extremes are larger in frequency and intensity with every additional increment of global warming

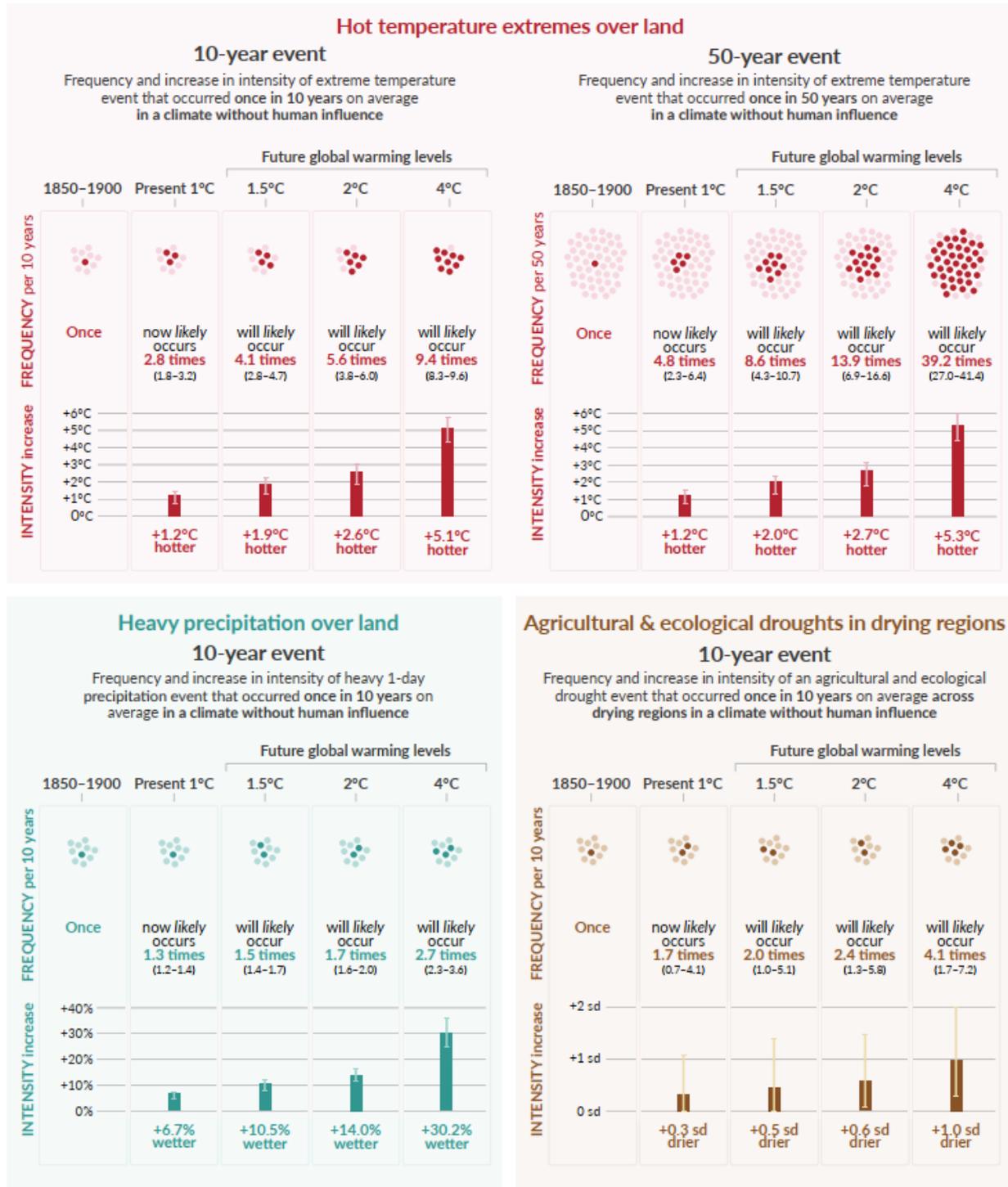


Abbildung SPM.6 | Projizierte Änderungen der Intensität und Häufigkeit von heißen Temperaturextremen über Land, extremen Niederschlägen über Land und landwirtschaftlichen und ökologischen Dürren in trockener werdenden Regionen.

Projizierte Änderungen werden für eine globale Erwärmung von 1 °C, 1,5 °C, 2 °C und 4 °C dargestellt und beziehen sich auf den Zeitraum von 1850 bis 1900⁹, der ein Klima ohne Einfluss des Menschen repräsentiert. Die Abbildung zeigt Häufigkeiten und Intensitätszunahmen von 10- oder 50-Jahres-Extremereignissen im Vergleich zum Referenzzeitraum (1850–1900) bei verschiedenen Niveaus globaler Erwärmung.

Heiße Temperaturextreme sind als diejenigen täglichen Höchsttemperaturen über Land definiert, die während des Referenzzeitraums 1850–1900 im Durchschnitt einmal in einem Jahrzehnt (10-Jahres-Ereignis) oder einmal in 50 Jahren (50-Jahres-Ereignis) überschritten wurden. **Extreme Niederschlagsereignisse** sind als diejenige tägliche Niederschlagsmenge über Land definiert, die während des Referenzzeitraums 1850–1900 im Durchschnitt einmal in einem Jahrzehnt überschritten wurde. **Landwirtschaftliche und ökologische Dürreereignisse** sind als derjenige Jahresdurchschnitt der Bodenfeuchte über die gesamte Profiltiefe definiert, der unter dem 10. Perzentil des Referenzzeitraums 1850–1900 liegt. Diese Extreme werden auf Ebene der Modellgitterzellen definiert. Für heiße Temperaturextreme und extreme Niederschläge werden die Ergebnisse für die globale Landfläche gezeigt. Für landwirtschaftliche und ökologische Dürre werden Ergebnisse ausschließlich für Regionen angegeben, die trockener werden; diese entsprechen denjenigen AR6-Regionen, in denen zumindest *mittleres Vertrauen* in eine projizierte Zunahme landwirtschaftlicher/ökologischer Dürre bei einer Erwärmung von 2° C gegenüber dem Referenzzeitraum 1850–1900 im Gekoppelten Modellvergleichsprojekt Phase 6 (*Coupled Model Intercomparison Project Phase 6*, CMIP6) besteht. Zu diesen Regionen gehören das westliche Nordamerika, das zentrale Nordamerika, das nördliche Zentralamerika, das südliche Zentralamerika, die Karibik, das nördliche Südamerika, das nordöstliche Südamerika, der südamerikanische Monsun, das südwestliche Südamerika, das südliche Südamerika, West- und Mitteleuropa und der Mittelmeerraum, das südwestliche Afrika, das südöstliche Afrika, Madagaskar, Ostaustralien sowie Südastralien (die Karibik ist in die Berechnung der Abbildung nicht einbezogen, da die Zahl an vollständig mit Landflächen gefüllten Gitterzellen zu gering ist). In den nicht trockener werdenden Regionen ist insgesamt weder eine Zunahme noch eine Abnahme des Schweregrads von Dürren zu verzeichnen. Die Projektionen der Änderungen bei landwirtschaftlichen und ökologischen Dürren im CMIP Phase 5 (CMIP5)-Multi-Modell-Ensemble unterscheiden sich in einigen Regionen von denen in CMIP6, darunter in Teilen Afrikas und Asiens. Bewertungen bezüglich der projizierten Änderungen bei meteorologischen und hydrologischen Dürren finden sich in Kapitel 11. {11.6, 11.9}

Im **Abschnitt "Häufigkeit"** wird jedes Jahr durch einen Punkt dargestellt. Die dunklen Punkte stehen für Jahre, in denen der Schwellenwert zum Extrem überschritten wird, während die hellen Punkte für Jahre stehen, in denen dieser Schwellenwert nicht überschritten wird. Die Werte entsprechen den Medianen (fett gedruckt) und deren jeweiliger 5–95 %-Bandbreite auf der Grundlage des Multi-Modell-Ensembles aus CMIP6-Simulationen mit verschiedenen SSP-Szenarien. Aus Gründen der Konsistenz basiert die Anzahl der dunklen Punkte auf dem aufgerundeten Median. Im **Abschnitt "Intensität"** werden die Mediane und ihre 5–95 %-Bandbreite, die ebenfalls auf dem Multi-Modell-Ensemble aus CMIP6-Simulationen basieren, als dunkle beziehungsweise helle Balken dargestellt. Intensitätsänderungen von heißen Temperaturextremen und extremen Niederschlägen werden in Grad Celsius und in Prozent ausgedrückt. Bezüglich landwirtschaftlicher und ökologischer Dürre werden Intensitätsänderungen als Bruchteile der Standardabweichung der jährlichen Bodenfeuchte ausgedrückt.

{11.1, 11.3, 11.4, 11.6, 11.9, Abbildungen 11.12, 11.15, 11.6, 11.7 und 11.18}

B.2.3 Manche Regionen der mittleren Breiten und semi-aride Gebiete sowie die südamerikanische Monsunregion werden laut Projektionen den stärksten Temperaturanstieg der heißesten Tagen verzeichnen, und zwar um das 1,5- bis 2-fache der globalen Erwärmung (*hohes Vertrauen*). Die Arktis wird laut Projektionen den stärksten Temperaturanstieg der kältesten Tage verzeichnen, und zwar etwa um das Dreifache der globalen Erwärmung (*hohes Vertrauen*). Bei zusätzlicher globaler Erwärmung wird die Häufigkeit von marinen Hitzewellen weiter zunehmen (*hohes Vertrauen*), insbesondere im tropischen Ozean und der Arktis (*mittleres Vertrauen*).

{Box 9.2, 11.1, 11.3, 11.9, Cross-Chapter Box 11.1, Cross-Chapter Box 12.1, 12.4, TS.2.4, TS.2.6} (Abbildung SPM.6)

B.2.4 Es ist *sehr wahrscheinlich*, dass Starkniederschlagsereignisse in den meisten Regionen mit zusätzlicher globaler Erwärmung intensiver und häufiger werden. Auf globaler Ebene werden Ereignisse mit extremen Tagesniederschlägen laut Projektionen pro 1 °C globaler Erwärmung um etwa 7 % zunehmen (*hohes Vertrauen*). Der Anteil heftiger tropischer Wirbelstürme (Kategorien 4–5) und die Spitzenwindgeschwindigkeiten der heftigsten tropischen Wirbelstürme werden laut Projektionen auf globaler Ebene mit zunehmender globaler Erwärmung zunehmen (*hohes Vertrauen*).

{8.2, 11.4, 11.7, 11.9, Cross-Chapter Box 11.1, Box TS.6, TS.4.3.1} (Abbildung SPM.5, Abbildung SPM.6)

- B.2.5 Zusätzliche Erwärmung wird laut Projektionen das Auftauen von Permafrostböden sowie den Verlust der saisonalen Schneedecke, von Landeis und des arktischen Meereises weiter verstärken (*hohes Vertrauen*). Die Arktis wird bei den in diesem Bericht betrachteten fünf illustrativen Szenarien *wahrscheinlich* mindestens einmal vor 2050 im September praktisch meereisfrei sein³¹, wobei höhere Erwärmungsniveaus mit häufigerem Auftreten verbunden sind. Es besteht *geringes Vertrauen* in den projizierten Rückgang von antarktischem Meereis.
{4.3, 4.5, 7.4, 8.2, 8.4, Box 8.2, 9.3, 9.5, 12.4, Cross-Chapter Box 12.1, Atlas.5, Atlas.6, Atlas.8, Atlas.9, Atlas.11, TS.2.5} (Abbildung SPM.8)
- B.3 Fortschreitende globale Erwärmung wird laut Projektionen den globalen Wasserkreislauf weiter intensivieren, einschließlich seiner Variabilität, globaler Monsunniederschläge und der Heftigkeit von Niederschlags- und Trockenheitsereignissen.**
{4.3, 4.4, 4.5, 4.6, 8.2, 8.3, 8.4, 8.5, Box 8.2, 11.4, 11.6, 11.9, 12.4, Atlas.3} (Abbildung SPM.5, Abbildung SPM.6)
- B.3.1 Seit dem AR5 gibt es verstärkte Belege dafür, dass sich der globale Wasserkreislauf mit dem globalen Temperaturanstieg weiter intensivieren wird (*hohes Vertrauen*), wobei Niederschläge und Oberflächenabflüsse laut Projektionen über den meisten Landflächen pro Jahreszeit (*hohes Vertrauen*) und von Jahr zu Jahr (*mittleres Vertrauen*) variabler werden. Der durchschnittliche jährliche globale Niederschlag über Land wird laut Projektionen bis 2081–2100 beim Szenario mit sehr niedrigen Treibhausgasemissionen (SSP1-1.9) um 0–5 %, beim Szenario mit mittleren Treibhausgasemissionen (SSP2-4.5) um 1,5–8 % und beim Szenario mit sehr hohen Treibhausgasemissionen (SSP5-8.5) um 1–13 % gegenüber 1995–2014 zunehmen (*wahrscheinliche* Bandbreiten). Die Niederschläge werden laut Projektionen in hohen Breitengraden, über dem äquatorialen Pazifik und in Teilen der Monsungebiete zunehmen, jedoch über Teilen der Subtropen und einigen begrenzten Gebieten in den Tropen bei SSP2-4.5, SSP3-7.0 und SSP5-8.5 abnehmen (*sehr wahrscheinlich*). Der Anteil der globalen Landfläche, über dem nachweisbare Zunahmen oder Abnahmen des mittleren saisonalen Niederschlags auftreten, wird laut Projektionen zunehmen (*mittleres Vertrauen*). Es besteht *hohes Vertrauen* bezüglich eines früheren Beginns der Frühjahresschneesmelze, mit höheren Abflussspitzen auf Kosten der Sommerabflüsse in schneedominierten Regionen weltweit.
{4.3, 4.5, 4.6, 8.2, 8.4, Atlas.3, TS.2.6, TS.4.3, Box TS.6} (Abbildung SPM.5)
- B.3.2 Ein wärmeres Klima wird sehr feuchte und sehr trockene Wetter- und Klimaereignisse und Jahreszeiten verstärken, was Auswirkungen auf Überschwemmungen oder Dürren hat (*hohes Vertrauen*), aber wo und wie oft diese Ereignisse auftreten, hängt von den projizierten Änderungen der regionalen Atmosphärenzirkulation ab, einschließlich Monsun und Zugbahnen von Stürmen in den mittleren Breiten. Es ist *sehr wahrscheinlich*, dass die Niederschlagsvariabilität im Zusammenhang mit *El Niño–Southern Oscillation* in den Szenarien SSP2-4.5, SSP3-7.0 und SSP5-8.5 spätestens anfangs der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts verstärkt werden wird.
{4.3, 4.5, 4.6, 8.2, 8.4, 8.5, 11.4, 11.6, 11.9, 12.4, TS.2.6, TS.4.2, Box TS.6} (Abbildung SPM.5, Abbildung SPM.6)

³¹ monatliche durchschnittliche Meereisfläche von weniger als 1 Million Quadratkilometer, was etwa 15 % der durchschnittlichen September-Meereisfläche entspricht, die in den Jahren 1979–1988 beobachtet wurde.

- B.3.3 Monsunniederschläge werden auf globaler Ebene laut Projektionen mittel- bis langfristig zunehmen, insbesondere über Süd- und Südostasien, Ostasien und Westafrika, mit Ausnahme der äußeren westlichen Sahelzone (*hohes Vertrauen*). Für die Monsunzeit wird ein verzögertes Einsetzen über Nord- und Südamerika und Westafrika (*hohes Vertrauen*) sowie ein verzögertes Abklingen über Westafrika (*mittleres Vertrauen*) projiziert.
{4.4, 4.5, 8.2, 8.3, 8.4, Box 8.2, Box TS.13}
- B.3.4 Bei Szenarien mit hohen Treibhausgasemissionen (SSP3-7.0, SSP5-8.5) ist laut Projektionen eine Südwärtsverlagerung und Intensivierung der Zugbahnen von Sommerstürmen und der damit verbundenen Niederschläge in den mittleren Breiten der Südhalbkugel *wahrscheinlich*, aber kurzfristig wirkt die Erholung der stratosphärischen Ozonschicht diesen Änderungen entgegen (*hohes Vertrauen*). Es besteht *mittleres Vertrauen* bezüglich einer fortgesetzten polwärts gerichteten Verschiebung von Stürmen und ihren Niederschlägen im Nordpazifik, während in die projizierten Änderungen der nordatlantischen Sturmzugbahnen *geringes Vertrauen* besteht.
{4.4, 4.5, 8.4, TS.2.3, TS.4.2}
- B.4 Die Kohlenstoffsenken in Ozean und Landsystemen werden bei Szenarien mit steigenden CO₂-Emissionen laut Projektionen die Anreicherung von CO₂ in der Atmosphäre weniger wirksam verlangsamen.**
{4.3, 5.2, 5.4, 5.5, 5.6} (Abbildung SPM.7)
- B.4.1 Während die natürlichen Kohlenstoffsenken an Land und im Ozean laut Projektionen in absoluten Zahlen bei höheren CO₂-Emissionen zunehmend mehr CO₂ aufnehmen als bei niedrigeren, verlieren sie mit zunehmenden kumulativen CO₂-Emissionen an Wirksamkeit, d. h. der Anteil an Emissionen, der von Land und Ozean aufgenommen wird, nimmt ab. Dies wird laut Projektionen dazu führen, dass ein höherer Anteil des emittierten CO₂ in der Atmosphäre verbleibt (*hohes Vertrauen*).
{5.2, 5.4, Box TS.5} (Abbildung SPM.7)
- B.4.2 Auf der Grundlage von Modellprojektionen wird für das mittlere Treibhausgasemissionsszenario, das die atmosphärischen CO₂-Konzentrationen in diesem Jahrhundert stabilisiert (SSP2-4.5), projiziert, dass die CO₂-Aufnahmeraten durch Landsysteme und Ozean in der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts abnehmen werden (*hohes Vertrauen*). Bei den Szenarien mit sehr niedrigen und niedrigen Treibhausgasemissionen (SSP1-1.9, SSP1-2.6), in denen die CO₂-Konzentrationen im Laufe des 21. Jahrhunderts einen Höhepunkt erreichen und danach abnehmen, beginnen Landsysteme und Ozean als Reaktion auf die sinkenden atmosphärischen CO₂-Konzentrationen weniger Kohlenstoff aufzunehmen (*hohes Vertrauen*) und werden bei SSP1-1.9 bis 2100 zu einer schwachen Nettoquelle (*mittleres Vertrauen*). Es ist *sehr unwahrscheinlich*, dass die gesamte globale Land- und Ozeansenke in Szenarien ohne negative Nettoemissionen (SSP2-4.5, SSP3-7.0, SSP5-8.5) bis 2100 zu einer Quelle wird³².
{4.3, 5.4, 5.5, 5.6, Box TS.5, TS.3.3}

³² Diese projizierten Anpassungen der Kohlenstoffsenken an eine Stabilisierung oder einen Rückgang des atmosphärischen CO₂ sind bei Berechnungen verbleibender CO₂-Budgets berücksichtigt.

B.4.3 Das Ausmaß von Rückkopplungen zwischen Klimawandel und Kohlenstoffkreislauf wird bei Szenarien mit hohen CO₂-Emissionen größer, aber auch unsicherer (*sehr hohes Vertrauen*). Klimamodellprojektionen zeigen jedoch, dass die Unsicherheiten hinsichtlich der bis 2100 erreichten atmosphärischen CO₂-Konzentrationen von den Unterschieden zwischen den Emissionsszenarien dominiert werden (*hohes Vertrauen*). Zusätzliche, in den Klimamodellen noch nicht vollständig berücksichtigte Reaktionen von Ökosystemen auf Erwärmung, wie CO₂- und CH₄-Abgaben aus Feuchtgebieten, Tauen von Permafrost sowie Wald- und Flächenbrände, würden die Konzentrationen dieser Gase in der Atmosphäre weiter erhöhen (*hohes Vertrauen*). {5.4, Box TS.5, TS.3.2}

The proportion of CO₂ emissions taken up by land and ocean carbon sink is smaller in scenarios with higher cumulative CO₂ emissions

Total cumulative CO₂ emissions taken up by land and ocean (colours) and remaining in the atmosphere (grey) under the five illustrative scenarios from 1850 to 2100

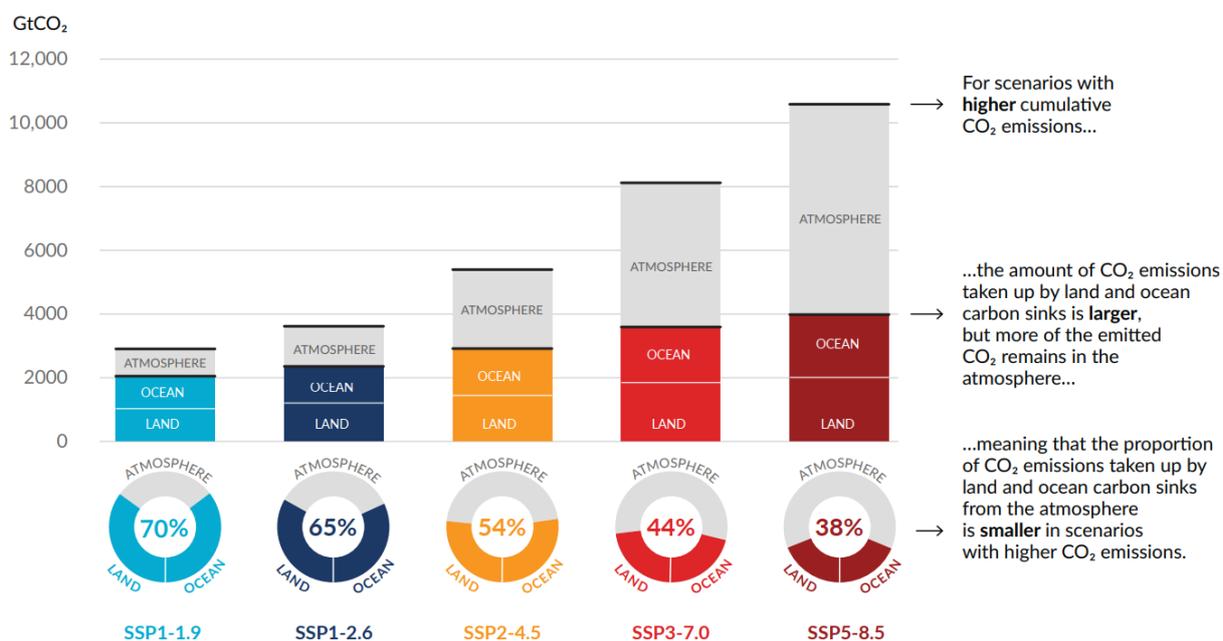


Abbildung SPM.7 | Kumulative anthropogene CO₂-Emissionen, die bei den fünf illustrativen Szenarien bis zum Jahr 2100 von Senken an Land und im Ozean aufgenommen werden.

Die kumulativen anthropogenen (vom Menschen verursachten) Kohlendioxid (CO₂)-Emissionen, die bei den fünf illustrativen Szenarien (SSP1-1.9, SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 und SSP5-8.5) von Senken an Land und im Ozean aufgenommen werden, sind von Klimamodellen des Gekoppelten Modellvergleichsprojekts Phase 6 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 6, CMIP6) in den konzentrationgetriebenen Simulationen von 1850 bis 2100 simuliert. Kohlenstoffsenken an Land und im Ozean reagieren auf vergangene, aktuelle und zukünftige Emissionen, daher sind hier kumulativen Senken von 1850 bis 2100 dargestellt. Während des historischen Zeitraums (1850–2019) haben die beobachteten Senken an Land und im Ozean 1430 Gt CO₂ (59 % der Emissionen) aufgenommen.

Das **Balkendiagramm** veranschaulicht die projizierte Menge an kumulativen anthropogenen CO₂-Emissionen (Gt CO₂) von 1850 bis 2100, die in der Atmosphäre verbleibt (grauer Teil) beziehungsweise bis zum Jahr 2100 von Landsystemen und dem Ozean aufgenommen wird (farbiger Teil). Das **Ringdiagramm** veranschaulicht den Anteil der kumulativen anthropogenen CO₂-Emissionen, der bis zum Jahr 2100 von den Senken an Land und im Ozean aufgenommen wird beziehungsweise in der Atmosphäre verbleibt. Werte in % geben den Anteil der kumulativen anthropogenen CO₂-Emissionen an, der bis zum Jahr 2100 von den Senken an Land und im Ozean gemeinsam aufgenommen wird. Die gesamten anthropogenen Kohlenstoffemissionen werden

berechnet, indem die globalen Nettoemissionen aus der Landnutzung aus der CMIP6-Szenariendatenbank zu den anderen sektoralen Emissionen addiert werden, die aus Klimamodellläufen mit vorgegebenen CO₂-Konzentrationen berechnet wurden³³. Die CO₂-Aufnahme durch Landsysteme und Ozean seit 1850 wird aus der Nettoproduktivität von Landbiomen (korrigiert um CO₂-Verluste aufgrund von Landnutzungsänderungen, indem Emissionen aus Landnutzungsänderungen addiert wurden) und dem Netto-CO₂-Fluss aus dem Ozean berechnet.

{5.2.1; Tabelle 5.1, 5.4.5; Abbildung 5.25; Box TS.5; Box TS.5, Abbildung 1}

B.5 Viele Veränderungen aufgrund vergangener und künftiger Treibhausgasemissionen sind über Jahrhunderte bis Jahrtausende unumkehrbar, insbesondere Veränderungen des Ozeans, von Eisschilden und des globalen Meeresspiegels.

{2.3, Cross-Chapter Box 2.4, 4.3, 4.5, 4.7, 5.3, 9.2, 9.4, 9.5, 9.6, Box 9.4} (Abbildung SPM.8)

B.5.1 Vergangene Treibhausgasemissionen seit 1750 haben dazu geführt, dass sich der globale Ozean in Zukunft unweigerlich erwärmen wird (*hohes Vertrauen*). Für den Rest des 21. Jahrhunderts liegt die *wahrscheinliche* Ozeanerwärmung zwischen dem 2–4- (SSP1-2.6) und dem 4–8-Fachen (SSP5-8.5) der Änderung von 1971–2018. Auf der Grundlage von Belegen aus mehreren, unterschiedlichen Untersuchungsansätzen werden die Stratifizierung des oberen Ozeans (*praktisch sicher*), die Ozeanversauerung (*praktisch sicher*) und der Sauerstoffentzug aus dem Ozean (*hohes Vertrauen*) im 21. Jahrhundert weiter zunehmen, wobei die Geschwindigkeiten dieser Zunahmen von den künftigen Emissionen abhängen. Die Änderungen der globalen Ozeantemperatur (*sehr hohes Vertrauen*), der Versauerung der Tiefsee (*sehr hohes Vertrauen*) und des Sauerstoffentzugs (*mittleres Vertrauen*) sind auf Zeitskalen von Jahrhunderten bis Jahrtausenden unumkehrbar.

{4.3, 4.5, 4.7, 5.3, 9.2, TS.2.4} (Abbildung SPM.8)

B.5.2 Gebirgs- und Polargletscher werden unweigerlich noch Jahrzehnte oder Jahrhunderte weiter schmelzen (*sehr hohes Vertrauen*). Der Verlust von Permafrost-Kohlenstoff nach dem Tauen von Permafrost ist auf Zeitskalen von Jahrhunderten unumkehrbar (*hohes Vertrauen*). Ein fortgesetzter Eisverlust im Verlauf des 21. Jahrhunderts ist für den Grönländischen Eisschild *praktisch sicher* und für den Antarktischen Eisschild *wahrscheinlich*. Es besteht ein *hohes Vertrauen* darin, dass der gesamte Eisverlust des Grönländischen Eisschildes mit den kumulativen Emissionen zunehmen wird. Es gibt *begrenzte Belege* für Effekte mit geringer Eintrittswahrscheinlichkeit und erheblichen Folgen (zurückzuführen auf Instabilitätsprozesse in Eisschilden, die durch tiefgreifende Unsicherheiten gekennzeichnet und in manchen Fällen mit Kipppunkten verbunden sind), die den Eisverlust des Antarktischen Eisschildes bei Szenarien mit hohen Treibhausgasemissionen über Jahrhunderte hinweg stark erhöhen würden³⁴.

{4.3, 4.7, 5.4, 9.4, 9.5, Box 9.4, Box TS.1, TS.2.5}

³³ Die anderen sektoralen Emissionen werden als Restmenge der Netto-CO₂-Aufnahme von Landsystemen und Ozean sowie der vorgegebenen atmosphärischen CO₂-Konzentrationsänderungen in den CMIP6-Simulationen berechnet. Bei diesen berechneten Emissionen handelt es sich um Nettoemissionen, bei denen die anthropogenen Bruttoemissionen nicht von implizit berücksichtigten CO₂-Entnahmen getrennt angegeben werden.

³⁴ Effekte mit geringer Eintrittswahrscheinlichkeit und erheblichen Folgen (*low-likelihood, high-impact outcomes*) sind solche, deren Eintrittswahrscheinlichkeit gering oder nicht genau bekannt ist (wie im Zusammenhang mit tiefgreifender Unsicherheit),

B.5.3 Es ist *praktisch sicher*, dass der mittlere globale Meeresspiegel im Laufe des 21. Jahrhunderts weiter ansteigen wird. Gegenüber 1995–2014 beträgt der *wahrscheinliche* Anstieg des mittleren globalen Meeresspiegels bis 2100 beim Szenario mit sehr niedrigen Treibhausgasemissionen (SSP1-1.9) 0,28–0,55 m, beim Szenario mit niedrigen Treibhausgasemissionen (SSP1-2.6) 0,32–0,62 m, beim Szenario mit mittleren Treibhausgasemissionen (SSP2-4.5) 0,44–0,76 m und beim Szenario mit sehr hohen Treibhausgasemissionen (SSP5-8.5) 0,63–1,01 m. Bis 2150 beträgt er beim sehr niedrigen Szenario (SSP1-1.9) 0,37–0,86 m, beim niedrigen Szenario (SSP1-2.6) 0,46–0,99 m, beim mittleren Szenario (SSP2-4.5) 0,66–1,33 m und beim sehr hohen Szenario (SSP5-8.5) 0,98–1,88 m (*mittleres Vertrauen*)³⁵. Ein mittlerer globaler Meeresspiegelanstieg oberhalb der *wahrscheinlichen* Bandbreite – annähernd 2 m bis zum Jahr 2100 und 5 m bis zum Jahr 2150 bei einem Szenario mit sehr hohen Treibhausgasemissionen (SSP5-8.5) (*geringes Vertrauen*) – kann aufgrund der tiefen Unsicherheiten im Zusammenhang mit Eisschildprozessen nicht ausgeschlossen werden.

{4.3, 9.6, Box 9.4, Box TS.4} (Abbildung SPM.8)

B.5.4 Langfristig wird der Meeresspiegel aufgrund der anhaltenden Erwärmung der Tiefsee und des anhaltenden Abschmelzens der Eisschilde unweigerlich für Jahrhunderte bis Jahrtausende ansteigen und für Tausende von Jahren erhöht bleiben (*hohes Vertrauen*). Im Verlauf der nächsten 2 000 Jahre wird der mittlere globale Meeresspiegel um etwa 2 bis 3 m ansteigen, wenn die Erwärmung auf 1,5 °C begrenzt wird, um 2 bis 6 m, wenn sie auf 2° C begrenzt wird, und um 19 bis 22 m bei einer Erwärmung von 5° C, und wird er in den darauffolgenden Jahrtausenden weiter ansteigen (*geringes Vertrauen*). Projektionen des mittleren globalen Meeresspiegelanstiegs über mehrere Jahrtausende stimmen mit rekonstruierten Werten für vergangene warme Klimaperioden überein: *wahrscheinlich* 5–10 m höher als heute vor etwa 125 000 Jahren, als die globalen Temperaturen *sehr wahrscheinlich* 0,5° C–1,5° C höher waren als 1850–1900; und *sehr wahrscheinlich* 5–25 m höher vor etwa 3 Millionen Jahren, als die globalen Temperaturen 2,5° C–4° C höher waren (*mittleres Vertrauen*).

{2.3, Cross-Chapter Box 2.4, 9.6, Box TS.2, Box TS.4, Box TS.9}

deren potenzielle Folgen für die Gesellschaft und für Ökosysteme jedoch hoch sein könnten. Ein Kipppunkt ist eine kritische Schwelle, jenseits derer sich ein System neu organisiert, oft abrupt und/oder unumkehrbar. (Glossar) {1.4, Cross-Chapter Box 1.3, 4.7}

³⁵ Für den Vergleich mit dem im AR5 und SROCC verwendeten Referenzzeitraum 1986–2005 sind 0,03 m zu den Angaben des mittleren globalen Meeresspiegelanstiegs zu addieren. Für einen Vergleich mit dem in Abbildung SPM.8 verwendeten Referenzzeitraum von 1900 sind 0,16 m zu addieren.

Human activities affect all the major climate system components, with some responding over decades and others over centuries

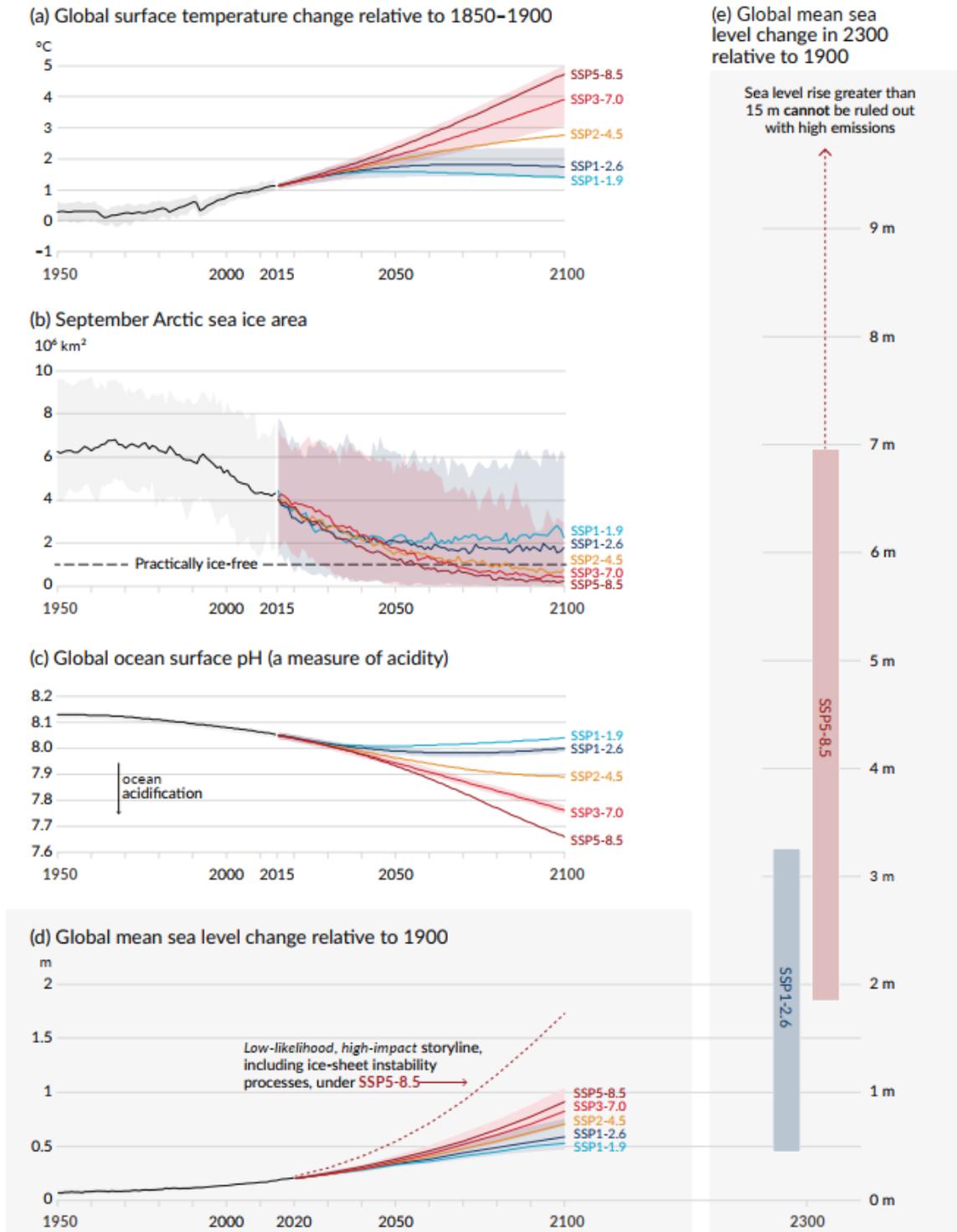


Abbildung SPM.8 | Ausgewählte Indikatoren des globalen Klimawandels bei den fünf illustrierten Szenarien, die in diesem Bericht verwendet werden

Die Projektionen für jedes der fünf Szenarien sind in Farbe dargestellt. Schattierungen stellen Unsicherheitsbereiche dar – weitere Einzelheiten zu den einzelnen Feldern siehe weiter unten. Die schwarzen Kurven stellen die historischen Simulationen (Tafeln a, b, c) oder die Beobachtungen (Tafel d) dar. Historische Werte sind in allen Grafiken enthalten, um den projizierten zukünftigen Änderungen Kontext zu geben.

Tafel (a) Änderungen der globalen Oberflächentemperatur in °C gegenüber 1850–1900. Diese Änderungen wurden durch die Kombination von Modellsimulationen aus dem Gekoppelten Modellvergleichsprojekt Phase 6 (*Coupled Model Intercomparison Project Phase 6*, CMIP6) mit beobachtungsbasierten Eingrenzungen auf der Grundlage von simulierter vergangener Erwärmung sowie mit einer aktualisierten Bewertung der Gleichgewichtsklimasensitivität (siehe Box SPM.1) ermittelt. Änderungen gegenüber 1850–1900 auf der Grundlage von 20-jährigen Mittelungszeiträumen werden berechnet, indem 0,85 °C (der beobachtete Anstieg der globalen Oberflächentemperatur von 1850–1900 bis 1995–2014) zu simulierten Änderungen gegenüber 1995–2014 addiert werden. *Sehr wahrscheinliche* Bandbreiten sind für SSP1-2.6 und SSP3-7.0 dargestellt.

Tafel (b) Arktische Meereisfläche im September in 10⁶ km² auf der Grundlage von CMIP6-Modellsimulationen. *Sehr wahrscheinliche* Bandbreiten sind für SSP1-2.6 und SSP3-7.0 dargestellt. Die Arktis wird laut Projektionen bei mittleren und hohen Treibhausgasemissionsszenarien etwa Mitte des Jahrhunderts praktisch eisfrei sein.

Tafel (c) Globaler pH-Wert an der Ozeanoberfläche (ein Maß für den Säuregehalt) auf der Grundlage von CMIP6-Modellsimulationen. *Sehr wahrscheinliche* Bandbreiten sind für SSP1-2.6 und SSP3-7.0 dargestellt.

Tafel (d) Änderung des mittleren globalen Meeresspiegels in Metern gegenüber 1900. Die historischen Änderungen sind Beobachtungsdaten (vor 1992 von Tidenpegeln und danach von Höhenmessern), und die zukünftigen Änderungen wurden basierend auf der Emulierung von CMIP-, Eisschild- und Gletschermodellen konsistent mit beobachtungsbasierten Eingrenzungen bewertet. *Wahrscheinliche* Bandbreiten sind für SSP1-2.6 und SSP3-7.0 dargestellt. Für die Meeresspiegeländerungen werden nur *wahrscheinliche* Werte angegeben, da es schwierig ist, die Verteilung von zutiefst unsicheren Prozessen zu beziffern. Die gestrichelte Kurve stellt die potenziellen Folgen dieser zutiefst unsicheren Prozesse dar. Sie zeigt das 83. Perzentil von SSP5-8.5-Projektionen, die Eisschildprozesse miteinschließen, welche mit geringer Wahrscheinlichkeit auftreten und mit großen Folgen verbunden sind und die nicht ausgeschlossen werden können; aufgrund des *geringen Vertrauens* in Projektionen dieser Prozesse ist diese Kurve nicht Teil einer *wahrscheinlichen* Bandbreite. Änderungen gegenüber 1900 werden berechnet, indem 0,158 m (der beobachtete mittlere globale Meeresspiegelanstieg von 1900 bis 1995–2014) zu simulierten und beobachteten Änderungen gegenüber 1995–2014 addiert werden.

Tafel (e) Änderung des mittleren globalen Meeresspiegels im Jahr 2300 in Metern gegenüber 1900. Nur SSP1-2.6 und SSP5-8.5 werden für 2300 projiziert, da für die anderen Szenarien zu wenige Simulationen über 2100 hinausgehen, als dass belastbare Ergebnisse erzielt werden könnten. Die 17.–83.-Perzentilbandbreiten sind schattiert. Der gestrichelte Pfeil veranschaulicht das 83. Perzentil von SSP5-8.5-Projektionen, die Eisschildprozesse miteinschließen, welche mit geringer Wahrscheinlichkeit auftreten und mit großen Folgen verbunden sind und die nicht ausgeschlossen werden können.

Die Tafeln (b) und (c) beruhen auf einzelnen Simulationen jedes Modells und enthalten daher eine Komponente interner Variabilität. Die Tafeln (a), (d) und (e) beruhen auf langfristigen Durchschnittswerten, so dass die Beiträge von interner Variabilität gering sind.

{4.3; Abbildungen 4.2, 4.8 und 4.11; 9.6; Abbildung 9.27; Abbildungen TS.8 und TS.11; Box TS.4, Abbildung 1}

C. Klimainformationen für Risikobewertung und regionale Anpassung

Naturwissenschaftliche Klimainformationen befasst sich damit, wie das Klimasystem auf das Zusammenspiel zwischen Einfluss des Menschen, natürlichen Antriebsfaktoren und interner Variabilität reagiert. Wissen über die Reaktion des Klimas und die Bandbreite möglicher Konsequenzen, einschließlich von Effekten mit geringer Eintrittswahrscheinlichkeit und erheblichen Folgen, bildet die Grundlage für Klimadienste, die Bewertung klimabezogener Risiken und die Anpassungsplanung. Naturwissenschaftliche Klimainformationen auf globaler, regionaler und lokaler Ebene wird auf der Basis von Belegen aus mehreren, unterschiedlichen Untersuchungsansätzen gewonnen, darunter beobachtungsbasierte Produkte, Klimamodellerggebnisse und maßgeschneiderte Diagnosen.

C.1 Natürliche Antriebsfaktoren und interne Schwankungen werden die vom Menschen verursachten Veränderungen modulieren, vor allem auf regionaler Ebene und in naher Zukunft; über Jahrhunderte betrachtet hat dies geringe Auswirkungen auf die globale Erwärmung. Es ist wichtig, diese Modulationen bei der Planung für die gesamte Bandbreite möglicher Veränderungen zu berücksichtigen. {1.4, 2.2, 3.3, Cross-Chapter Box 3.1, 4.4, 4.6, Cross-Chapter Box 4.1, Box 7.2, 8.3, 8.5, 9.2, 10.3, 10.4, 10.6, 11.3, 12.5, Atlas.4, Atlas.5, Atlas.8, Atlas.9, Atlas.10, Atlas.11, Cross-Chapter Box Atlas.2}

C.1.1 Die historischen Aufzeichnungen der globalen Oberflächentemperatur zeigen, dass dekadische Schwankungen darunterliegende, vom Menschen verursachte langfristige Veränderungen verstärkt und verdeckt haben. Diese Schwankungen werden auch in Zukunft anhalten (*sehr hohes Vertrauen*). So haben beispielsweise die interne dekadische Variabilität und Schwankungen von solaren und vulkanischen Antriebsfaktoren die vom Menschen verursachte globale Erwärmung an der Erdoberfläche im Zeitraum 1998–2012 teilweise verdeckt, wobei ausgeprägte regionale und saisonale Signaturen zu verzeichnen sind (*hohes Vertrauen*). Nichtsdestotrotz setzte sich die Erwärmung des Klimasystems in diesem Zeitraum fort, was sich sowohl in der fortgesetzten Erwärmung des globalen Ozeans (*sehr hohes Vertrauen*) als auch in der fortgesetzten Zunahme von Hitzeextremen über Land (*mittleres Vertrauen*) widerspiegelt. {1.4, 3.3, Cross-Chapter Box 3.1, 4.4, Box 7.2, 9.2, 11.3, Cross-Section Box TS.1} (Abbildung SPM.1)

C.1.2 Die projizierten, vom Menschen verursachten Änderungen des durchschnittlichen Klimas und von klimatischen Antriebsfaktoren mit Relevanz für Klimafolgen (*climatic impact drivers*, CIDs)³⁶, einschließlich von Extremen, werden durch interne Variabilität³⁷ entweder verstärkt oder abgeschwächt werden (*hohes Vertrauen*). Eine kurzfristige Abkühlung gegenüber dem gegenwärtigen Klima an einem beliebigen Ort könnte auftreten und wäre mit dem Anstieg der globalen Oberflächentemperatur aufgrund des Einflusses des Menschen vereinbar (*hohes Vertrauen*). {1.4, 4.4, 4.6, 10.4, 11.3, 12.5, Atlas.5, Atlas.10, Atlas.11, TS.4.2}

³⁶ Klimatische Antriebsfaktoren mit Relevanz für Klimafolgen (*climatic impact drivers*, CIDs) sind physikalische Klimasystembedingungen (z. B. Mittelwerte, Ereignisse, Extreme), die ein Element der Gesellschaft oder von Ökosystemen beeinträchtigen. Abhängig von der Systemtoleranz können CIDs und deren Veränderungen schädlich, vorteilhaft, neutral oder eine Mischung aus allem über interagierende Systemelemente und Regionen hinweg sein (Glossar). Zu den CID-Typen gehören Hitze und Kälte, Nässe und Trockenheit, Wind, Schnee und Eis, Küsten und offener Ozean.

³⁷ Zu den aufgrund ihres regionalen Einflusses wichtigsten internen Variabilitätsphänomenen gehören die *El Niño–Southern Oscillation*, die Pazifische Dekaden-Oszillation und die Atlantische Multidekaden-Oszillation.

- C.1.3 Für die Verstärkung und Abschwächung der beobachteten vom Menschen verursachten Niederschlagsänderungen (über einzelne bis mehrere Jahrzehnte gemittelt) in vielen Landregionen war weitgehend interne Variabilität verantwortlich (*hohes Vertrauen*). Auf globaler und regionaler Ebene werden Änderungen des Monsuns in naher Zukunft von den Auswirkungen interner Variabilität dominiert sein (*mittleres Vertrauen*). Zusätzlich zum Einfluss von interner Variabilität sind projizierte Änderungen der Niederschläge in naher Zukunft auf globaler und regionaler Ebene aufgrund von Modellunsicherheit und von Unsicherheit bezüglich der Antriebe durch natürliche und anthropogene Aerosole unsicher (*mittleres Vertrauen*).
{1.4, 4.4, 8.3, 8.5, 10.3, 10.4, 10.5, 10.6, Atlas.4, Atlas.8, Atlas.9, Atlas.10, Atlas.11, Cross-Chapter Box Atlas.2, TS.4.2, Box TS.6, Box TS.13}
- C.1.4 Auf der Grundlage paläoklimatischer und historischer Belege ist es *wahrscheinlich*, dass im 21. Jahrhundert mindestens ein großer explosiver Vulkanausbruch stattfinden wird³⁸. Ein solcher Ausbruch würde die globale Oberflächentemperatur und den Niederschlag, insbesondere über Land, für ein bis drei Jahre verringern, die globale Monsunzirkulation verändern, extreme Niederschläge modifizieren und viele CIDs verändern (*mittleres Vertrauen*). Sollte ein solcher Ausbruch geschehen, würde dies also den vom Menschen verursachten Klimawandel vorübergehend und teilweise verdecken.
{2.2, 4.4, Cross-Chapter Box 4.1, 8.5, TS.2.1}
- C.2 Bei weiterer globaler Erwärmung wird es laut Projektionen in jeder Region in zunehmendem Maße zu gleichzeitigen und vielfältigen Veränderungen von klimatischen Antriebsfaktoren mit Relevanz für Klimafolgen (*climatic impact-drivers*, CIDs) kommen. Veränderungen von mehreren CIDs wären bei 2 °C im Vergleich zu 1,5 °C globaler Erwärmung weiter verbreitet und bei höheren Erwärmungsniveaus sogar noch weiter verbreitet und/oder ausgeprägter.**
{8.2, 9.3, 9.5, 9.6, Box 10.3, 11.3, 11.4, 11.5, 11.6, 11.7, 11.9, Box 11.3, Box 11.4, Cross-Chapter Box 11.1, 12.2, 12.3, 12.4, 12.5, Cross-Chapter Box 12.1, Atlas.4, Atlas.5, Atlas.6, Atlas.7, Atlas.8, Atlas.9, Atlas.10, Atlas.11} (Tabelle SPM.1, Abbildung SPM.9)
- C.2.1 In allen Regionen³⁹ wird es laut Projektionen zu weiteren Zunahmen von heißen CIDs und Abnahmen kalter CIDs kommen (*hohes Vertrauen*). Weitere Rückgänge wird es laut Projektionen bei Permafrost, Schnee, Gletschern und Eisschilden sowie Eis auf Seen und arktischem Meereis geben (*mittleres bis hohes Vertrauen*)⁴⁰. Diese Änderungen wären bei einer globalen Erwärmung von 2 °C oder mehr größer als bei 1,5 °C (*hohes Vertrauen*). So werden laut Projektionen beispielsweise Schwellenwerte für extreme Hitze, die für Landwirtschaft und Gesundheit relevant sind, bei einem höheren globalen Erwärmungsniveau häufiger überschritten (*hohes Vertrauen*).
{9.3, 9.5, 11.3, 11.9, Cross-Chapter Box 11.1, 12.3, 12.4, 12.5, Cross-Chapter Box 12.1, Atlas.4, Atlas.5, Atlas.6, Atlas.7, Atlas.8, Atlas.9, Atlas.10, Atlas.11, TS.4.3} (Tabelle SPM.1, Abbildung SPM.9)

³⁸ Auf der Grundlage von 2 500-Jahres-Rekonstruktionen kommt es im Durchschnitt zweimal pro Jahrhundert zu Eruptionen, die negativer als -1 W/m^2 sind.

³⁹ Als Regionen werden hier die AR6 WGI-Referenzregionen bezeichnet, die in diesem Bericht verwendet werden, um Informationen in subkontinentalen und ozeanischen Regionen zusammenzufassen. Sofern nicht anders angegeben, werden Änderungen mit den Durchschnittswerten über die vergangenen 20–40 Jahre verglichen. {1.4, 12.4, Atlas.1, Interaktiver Atlas}.

⁴⁰ Das spezifische Vertrauens- oder Wahrscheinlichkeitsniveau hängt von der betrachteten Region ab. Einzelheiten finden sich in der *Technical Summary* und dem zugrundeliegenden Bericht.

- C.2.2 Bei einer globalen Erwärmung von 1,5 °C werden Starkniederschläge und damit verbundene Überschwemmungen laut Projektionen in den meisten Regionen Afrikas und Asiens (*hohes Vertrauen*), Nordamerikas (*mittleres bis hohes Vertrauen*)⁴⁰ und Europas (*mittleres Vertrauen*) intensiver werden und häufiger auftreten. Außerdem werden in einigen wenigen Regionen auf allen bewohnten Kontinenten außer Asien laut Projektionen gegenüber 1850–1900 häufigere und/oder schwerere landwirtschaftliche und ökologische Dürren auftreten (*mittleres Vertrauen*); Zunahmen von meteorologischen Dürren wird es laut Projektionen in einigen wenigen Regionen ebenfalls geben (*mittleres Vertrauen*). Eine kleine Anzahl von Regionen wird laut Projektionen Zunahmen oder Abnahmen der mittleren Niederschlagsmenge verzeichnen (*mittleres Vertrauen*).
{11.4, 11.5, 11.6, 11.9, Atlas.4, Atlas.5, Atlas.7, Atlas.8, Atlas.9, Atlas.10, Atlas.11, TS.4.3} (Tabelle SPM.1)
- C.2.3 Bei einer globalen Erwärmung von 2 °C und mehr sind das Vertrauensniveau und das Ausmaß der Änderungen bei Dürren, Starkniederschlägen und mittleren Niederschlägen höher als bei 1,5 °C. Starkniederschläge und damit verbundene Überschwemmungen werden laut Projektionen auf den Pazifischen Inseln und in vielen Regionen Nordamerikas und Europas intensiver und häufiger auftreten (*mittleres bis hohes Vertrauen*)⁴⁰. Diese Änderungen sind auch in manchen Regionen Australasiens sowie Zentral- und Südamerikas zu beobachten (*mittleres Vertrauen*). In mehreren Regionen Afrikas, Südamerikas und Europas wird es laut Projektionen mit *mittlerem bis hohem Vertrauen*⁴⁰ zu einer Zunahme der Häufigkeit und/oder des Schweregrads landwirtschaftlicher und ökologischer Dürren kommen; auch in Australasien, Zentral- und Nordamerika sowie in der Karibik zeigen die Projektionen eine Zunahme mit *mittlerem Vertrauen*. Eine kleine Anzahl von Regionen in Afrika, Australasien, Europa und Nordamerika wird laut Projektionen auch von Zunahmen hydrologischer Dürren betroffen sein, und mehrere Regionen werden laut Projektionen von Zunahmen oder Abnahmen meteorologischer Dürren betroffen sein, wobei mehr Regionen eine Zunahme aufweisen (*mittleres Vertrauen*). Die durchschnittliche Niederschlagsmenge wird laut Projektionen in allen polaren, nordeuropäischen und nordamerikanischen Regionen, den meisten asiatischen Regionen und zwei Regionen Südamerikas zunehmen (*hohes Vertrauen*).
{11.4, 11.6, 11.9, Cross-Chapter Box 11.1, 12.4, 12.5, Cross-Chapter Box 12.1, Atlas.5, Atlas.7, Atlas.8, Atlas.9, Atlas.11, TS.4.3} (Tabelle SPM.1, Abbildung SPM.5, Abbildung SPM.6, Abbildung SPM.9)
- C.2.4 Im Vergleich zu einer globalen Erwärmung von 1,5 °C werden sich laut Projektionen bei 2 °C und darüber mehr CIDs in mehr Regionen verändern (*hohes Vertrauen*). Zu den regionalspezifischen Änderungen gehören eine Intensivierung tropischer Wirbelstürme und/oder außertropischer Stürme (*mittleres Vertrauen*), Zunahmen von Flusshochwassern (*mittleres bis hohes Vertrauen*)⁴⁰, Rückgänge der durchschnittlichen Niederschlagsmenge und Ariditätszunahmen (*mittleres bis hohes Vertrauen*)⁴⁰ sowie Zunahmen von Feuerwetter (*mittleres bis hohes Vertrauen*)⁴⁰. In den meisten Regionen besteht *geringes Vertrauen* hinsichtlich möglicher künftiger Änderungen bei anderen CIDs wie Hagel, Eisstürmen, schweren Stürmen, Staubstürmen, starkem Schneefall und Erdbeben.
{11.7, 11.9, Cross-Chapter Box 11.1, 12.4, 12.5, Cross-Chapter Box 12.1, Atlas.4, Atlas.6, Atlas.7, Atlas.8, Atlas.10, TS.4.3.1, TS.4.3.2, TS.5} (Tabelle SPM.1, Abbildung SPM.9)
- C.2.5 Es ist *sehr wahrscheinlich bis praktisch sicher*⁴⁰, dass sich der regionale mittlere relative Meeresspiegelanstieg über das gesamte 21. Jahrhundert fortsetzen wird, außer in einigen wenigen Regionen mit erheblichen geologischen Landhebungsraten. Etwa zwei Drittel der globalen Küstenlinie weisen laut Projektionen einen regionalen relativen Meeresspiegelanstieg im Bereich von ± 20 % des mittleren globalen Anstiegs auf (*mittleres Vertrauen*). Aufgrund des relativen Meeresspiegelanstiegs werden extreme Meeresspiegelereignisse, die in der jüngsten Vergangenheit einmal pro Jahrhundert auftraten, laut Projektionen bis zum Jahr 2100 an mehr als der Hälfte aller Pegelstandorte mindestens einmal pro Jahr auftreten (*hohes Vertrauen*). Der relative Meeresspiegelanstieg trägt zu Zunahmen der Häufigkeit und des Ausmaßes von Küstenüber-

schwemmungen in niedrig gelegenen Gebieten und zur Küstenerosion an den meisten Sandküsten bei (*hohes Vertrauen*).

{9.6, 12.4, 12.5, Cross-Chapter Box 12.1, Box TS.4, TS.4.3} (Abbildung SPM.9)

C.2.6 Städte verstärken lokal die vom Menschen verursachte Erwärmung, und eine weitere Verstädterung zusammen mit häufigeren Hitzeextremen wird den Schweregrad von Hitzewellen erhöhen (*sehr hohes Vertrauen*). Verstädterung erhöht auch Durchschnitts- und Starkniederschläge über und/oder im Windschatten von Städten (*mittleres Vertrauen*) sowie die daraus resultierende Abflussintensität (*hohes Vertrauen*). In Küstenstädten wird die Kombination aus häufigeren extremen Meeresspiegelereignissen (infolge des Meeresspiegelanstiegs und von Sturmfluten) und extremen Niederschlags-/Abflussereignissen die Wahrscheinlichkeit von Überschwemmungen erhöhen (*hohes Vertrauen*).

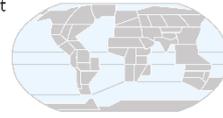
{8.2, Box 10.3, 11.3, 12.4, Box TS.14}

C.2.7 Viele Regionen werden mit höherer globaler Erwärmung laut Projektionen eine erhöhte Wahrscheinlichkeit für zusammengesetzte Ereignisse aufweisen (*hohes Vertrauen*). Vor allem das Zusammentreffen von Hitzewellen und Dürren wird *wahrscheinlich* häufiger werden. Gleichzeitig auftretende Extremereignisse an mehreren Orten, auch in landwirtschaftlichen Anbaugebieten, werden bei 2 °C und mehr globaler Erwärmung häufiger auftreten als bei 1,5 °C (*hohes Vertrauen*).

{11.8, Box 11.3, Box 11.4, 12.3, 12.4, Cross-Chapter Box 12.1, TS.4.3} (Tabelle SPM.1)

Multiple climatic impact-drivers are projected to change in all regions of the world

Climatic impact-drivers (CIDs) are physical climate system conditions (e.g., means, events, extremes) that affect an element of society or ecosystems. Depending on system tolerance, CIDs and their changes can be detrimental, beneficial, neutral, or a mixture of each across interacting system elements and regions. The CIDs are grouped into seven types, which are summarized under the icons in the figure. All regions are projected to experience changes in at least 5 CIDs. Almost all (96%) are projected to experience changes in at least 10 CIDs and half in at least 15 CIDs. For many CID changes, there is wide geographical variation, and so each region is projected to experience a specific set of CID changes. Each bar in the chart represents a specific geographical set of changes that can be explored in the WGI Interactive Atlas.



interactive-atlas.ipcc.ch

Number of land & coastal regions (a) and open-ocean regions (b) where each climatic impact-driver (CID) is projected to **increase** or **decrease** with **high confidence** (dark shade) or **medium confidence** (light shade)

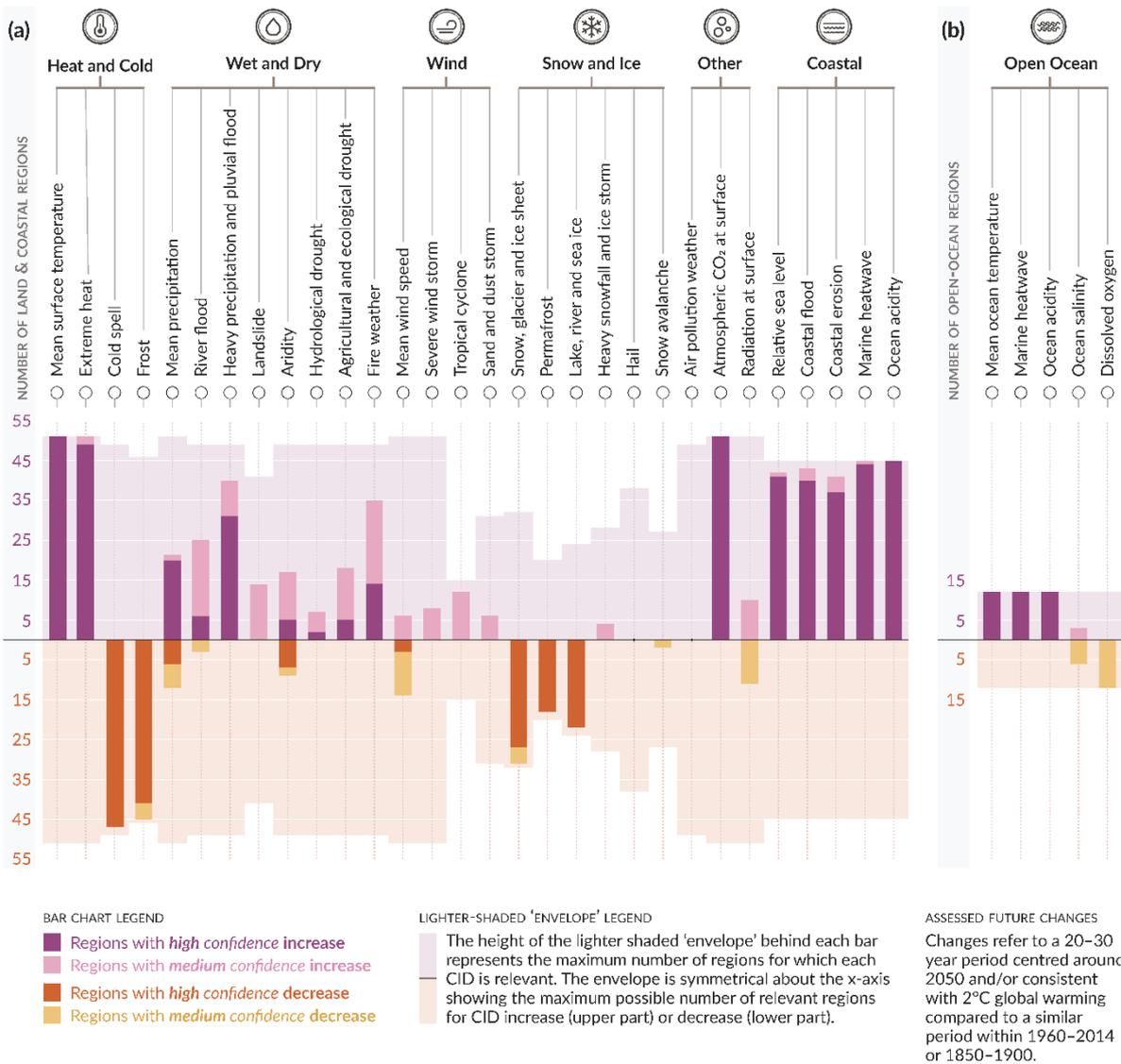


Abbildung SPM.9 | Synthese der Anzahl an AR6 WGI-Referenzregionen, für die eine Änderung der klimatischen Antriebsfaktoren mit Relevanz für Klimafolgen (*climatic impact-drivers*) projiziert wird

Es werden insgesamt 35 klimatische Antriebsfaktoren mit Relevanz für Klimafolgen (*climatic impact-drivers*, CIDs) gezeigt, die in sieben Typen gruppiert sind: Hitze und Kälte; Nässe und Trockenheit; Wind, Schnee und Eis; Küsten; offener Ozean und andere. Für jeden CID zeigt der Balken in der Grafik unten die Anzahl der AR6 WGI-Referenzregionen an, in denen dieser sich laut Projektionen ändern wird. Die **Farben** stellen die Änderungsrichtung und das Vertrauensniveau bezüglich der Änderung dar: Violett bedeutet eine Zunahme, während Braun eine Abnahme anzeigt; dunklere und hellere Schattierungen stehen für *hohes*

beziehungsweise *mittleres Vertrauen*. Hellere Hintergrundfarben stehen für die maximale Anzahl an Regionen, für welche die einzelnen CIDs im Großen und Ganzen relevant sind.

Tafel (a) zeigt die 30 CIDs, die für die **Land- und Küstenregionen** relevant sind, während **Tafel (b)** die fünf CIDs zeigt, die für die **offenen Ozeanregionen** relevant sind. Marine Hitzewellen und Ozeanversauerung werden für Küstenregionen in Tafel (a) und für offene Ozeanregionen in Tafel (b) bewertet. Änderungen beziehen sich auf einen Zeitraum von 20 bis 30 Jahren, der das Jahr 2050 als Mittelpunkt hat und/oder im Einklang mit einer globalen Erwärmung von 2 °C gegenüber einem ähnlichen Zeitraum zwischen 1960 und 2014 steht; Ausnahmen sind hydrologische Dürre sowie landwirtschaftliche und ökologische Dürre, die mit dem Zeitraum 1850–1900 verglichen werden. Definitionen der Regionen finden sich in den Abschnitten 12.4 und Atlas.1 sowie dem Interaktiven Atlas (siehe <https://interactive-atlas.ipcc.ch>).

{11.9, 12.2, 12.4, Atlas.1, Tabelle TS.5, Abbildungen TS.22 und TS.25} (Tabelle SPM.1)

C.3 Effekte mit geringer Eintrittswahrscheinlichkeit – wie der Zusammenbruch von Eisschilden, abrupte Veränderungen der Ozeanzirkulation, einige zusammengesetzte Extremereignisse und eine Erwärmung, die wesentlich über die als *sehr wahrscheinlich* bewertete Bandbreite der künftigen Erwärmung hinausgeht – können nicht ausgeschlossen werden und sind Teil der Risikobewertung.

{1.4, Cross-Chapter Box 1.3, 4.3, 4.4, 4.8, Cross-Chapter Box 4.1, 8.6, 9.2, Box 9.4, 11.8, Box 11.2, Cross-Chapter Box 12.1} (Tabelle SPM.1)

C.3.1 Wenn die globale Erwärmung die als *sehr wahrscheinlich* bewertete Bandbreite für ein bestimmtes Treibhausgasemissionsszenario, einschließlich Szenarien mit niedrigen Treibhausgasemissionen, überschreitet, würden auch globale und regionale Änderungen vieler Aspekte des Klimasystems, wie z. B. regionale Niederschläge und andere CIDs, ihre als *sehr wahrscheinlich* bewerteten Bandbreiten überschreiten (*hohes Vertrauen*). Solche Effekte mit geringer Eintrittswahrscheinlichkeit bei großer Erwärmung sind mit potenziell sehr großen Folgen verbunden, z. B. durch intensivere und häufigere Hitzewellen und Starkniederschläge, sowie mit hohen Risiken für menschliche und ökologische Systeme, insbesondere bei Szenarien mit hohen Treibhausgasemissionen.

{Cross-Chapter Box 1.3, 4.3, 4.4, 4.8, Box 9.4, Box 11.2, Cross-Chapter Box 12.1, TS.1.4, Box TS.3, Box TS.4} (Tabelle SPM.1)

C.3.2 Effekte mit geringer Eintrittswahrscheinlichkeit und erheblichen Folgen³⁴ könnten auf globaler und regionaler Ebene selbst bei einer globalen Erwärmung innerhalb der *sehr wahrscheinlichen* Bandbreite für ein bestimmtes Treibhausgasemissionsszenario auftreten. Die Wahrscheinlichkeit von Effekten mit geringer Eintrittswahrscheinlichkeit und erheblichen Folgen steigt mit zunehmender globaler Erwärmung (*hohes Vertrauen*). Abrupte Reaktionen und Kippunkte des Klimasystems, wie z. B. eine starke Zunahme beim Abschmelzen des Antarktischen Eisschildes oder Waldsterben, können nicht ausgeschlossen werden (*hohes Vertrauen*).

{1.4, 4.3, 4.4, 4.8, 5.4, 8.6, Box 9.4, Cross-Chapter Box 12.1, TS.1.4, TS.2.5, Box TS.3, Box TS.4, Box TS.9} (Tabelle SPM.1)

C.3.3 Falls die globale Erwärmung zunimmt, werden einige zusammengesetzte Extremereignisse¹⁸ häufiger auftreten, die unter vergangenen und gegenwärtigen Klimabedingungen mit geringer Wahrscheinlichkeit verbunden waren; außerdem steigt die Wahrscheinlichkeit, dass Ereignisse mit erhöhter Intensität, Dauer und/oder räumlicher Ausdehnung auftreten, wie sie in Beobachtungsdaten noch nie verzeichnet worden sind (*hohes Vertrauen*).

{11.8, Box 11.2, Cross-Chapter Box 12.1, Box TS.3, Box TS.9}

- C.3.4 Die Atlantische Meridionale Umwälzbewegung wird sich im Laufe des 21. Jahrhunderts bei allen Emissions-szenarien *sehr wahrscheinlich* abschwächen. Während *hohes Vertrauen* bezüglich des Rückgangs im 21. Jahrhundert besteht, herrscht nur *geringes Vertrauen* bezüglich des Ausmaßes dieses Trends. Es besteht *mittleres Vertrauen* darin, dass es vor 2100 nicht zu einem abrupten Zusammenbruch kommen wird. Sollte es zu einem solchen Zusammenbruch kommen, würde dies *sehr wahrscheinlich* zu abrupten Verschiebungen regionaler Wettermuster und des Wasserkreislaufs führen, z. B. zu einer Südwärtsverlagerung des tropischen Regengürtels, einer Abschwächung des afrikanischen und des asiatischen Monsuns und einer Verstärkung des Monsuns auf der Südhalbkugel sowie zu Austrocknung in Europa.
{4.3, 8.6, 9.2, TS2.4, Box TS.3}
- C.3.5 Unvorhersehbare und seltene Naturereignisse, die nicht mit dem Einfluss des Menschen auf das Klima zusammenhängen, können zu Effekten mit geringer Eintrittswahrscheinlichkeit und erheblichen Folgen führen. So gab es in der Vergangenheit beispielsweise eine Reihe großer explosiver Vulkanausbrüche innerhalb von Jahrzehnten, die über mehrere Jahrzehnte hinweg erhebliche globale und regionale Klimastörungen verursachten. Solche Ereignisse können für die Zukunft nicht ausgeschlossen werden, sind aber aufgrund ihrer inhärenten Unvorhersehbarkeit nicht in den illustrativen Szenarien enthalten, auf die sich dieser Bericht bezieht.
{2.2, Cross-Chapter Box 4.1, Box TS.3} (Box SPM.1)

D. Begrenzung zukünftigen Klimawandels

Seit dem AR5 wurden Angaben zu verbleibenden CO₂-Budgets durch eine neue, erstmals im SR1.5 vorgestellte Methodik, aktualisierte Belege sowie die Integration von Ergebnissen aus mehreren, unterschiedlichen Untersuchungsansätzen verbessert. Ein umfassendes Spektrum möglicher zukünftiger Luftreinhaltungsmaßnahmen in Szenarien wird verwendet, um die Auswirkungen unterschiedlicher Annahmen auf Projektionen von Klima und Luftverschmutzung konsistent zu bewerten. Eine neue Entwicklung stellt die Möglichkeit dar, festzustellen, wann Reaktionen des Klimas auf Emissionssenkungen über die natürliche Klimavariabilität hinaus erkennbar würden, einschließlich interner Variabilität und der Reaktionen auf natürliche Antriebsfaktoren.

- D.1 Aus naturwissenschaftlicher Sicht erfordert die Begrenzung der vom Menschen verursachten globalen Erwärmung auf ein bestimmtes Niveau eine Begrenzung der kumulativen CO₂-Emissionen, wobei zumindest netto null CO₂-Emissionen erreicht werden müssen, zusammen mit starken Verringerungen anderer Treibhausgasemissionen. Starke, rasche und anhaltende Verringerungen von CH₄-Emissionen würden auch den Erwärmungseffekt begrenzen, der sich aus abnehmender Luftverschmutzung durch Aerosole ergibt, und die Luftqualität verbessern.**
{3.3, 4.6, 5.1, 5.2, 5.4, 5.5, 5.6, Box 5.2, Cross-Chapter Box 5.1, 6.7, 7.6, 9.6} (Abbildung SPM.10, Tabelle SPM.2)
- D.1.1 Dieser Bericht bestätigt mit *hohem Vertrauen* die Feststellung des AR5, dass eine nahezu lineare Beziehung zwischen den kumulativen anthropogenen CO₂-Emissionen und der von ihnen verursachten globalen Erwärmung besteht. Pro 1 000 Gt CO₂ kumulativer CO₂-Emissionen wird die globale Oberflächentemperatur

wahrscheinlich um 0,27 °C bis 0,63 °C erhöht, wobei der beste Schätzwert bei 0,45 °C liegt⁴¹. Dies ist eine geringere Bandbreite als im AR5 und SR1.5. Diese Größe wird als „vorübergehende Reaktion des Klimas auf kumulative CO₂-Emissionen“ (*transient climate response to cumulative CO₂ emissions*, TCRE) bezeichnet. Diese Beziehung bedeutet, dass das Erreichen von netto null⁴² anthropogenen CO₂-Emissionen eine Voraussetzung für die Stabilisierung des vom Menschen verursachten globalen Temperaturanstiegs auf einem beliebigen Niveau ist, dass aber eine Begrenzung des globalen Temperaturanstiegs auf ein bestimmtes Niveau die Begrenzung der kumulativen CO₂-Emissionen auf ein CO₂-Budget voraussetzt⁴³.

{5.4, 5.5, TS.1.3, TS.3.3, Box TS.5} (Abbildung SPM.10)

D.1.2 Im Verlaufe des Zeitraums 1850–2019 wurden insgesamt 2390 ± 240 (*wahrscheinliche* Bandbreite) Gt CO₂ an anthropogenem CO₂ emittiert. Die verbleibenden CO₂-Budgets wurden für mehrere globale Temperaturobergrenzen und verschiedene Wahrscheinlichkeitsniveaus berechnet, basierend auf der ermittelten TCRE und deren Unsicherheit sowie auf Abschätzungen der historischen Erwärmung, Variationen der projizierten Erwärmung durch Nicht-CO₂-Emissionen, Rückkopplungen im Klimasystem wie Emissionen aus tauendem Permafrost und der Änderung der globalen Oberflächentemperatur, nachdem die globalen anthropogenen CO₂-Emissionen netto Null erreichen.

{5.1, 5.5, Box 5.2, TS.3.3} (Tabelle SPM.2)

⁴¹ In der Literatur werden Einheiten von °C pro 1 000 PgC (Petagram Kohlenstoff) verwendet, und der AR6 gibt im zugrunde liegenden Bericht die *wahrscheinliche* TCRE-Bandbreite mit 1,0 °C bis 2,3 °C pro 1 000 PgC mit einem besten Schätzwert von 1,65 °C an.

⁴² Der Zustand, in dem anthropogene Kohlendioxid (CO₂)-Emissionen durch anthropogene CO₂-Entnahmen über einen bestimmten Zeitraum ausgeglichen sind (Glossar).

⁴³ Der Begriff „CO₂-Budget“ bezieht sich auf die maximale Menge an kumulativen globalen anthropogenen Netto-CO₂-Emissionen, die dazu führen würde, dass die globale Erwärmung mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit auf ein bestimmtes Niveau begrenzt würde, wobei die Wirkung anderer anthropogener klimatischer Antriebsfaktoren berücksichtigt wird. Bezieht sich die Angabe auf [die kumulativen Emissionen seit] der vorindustriellen Zeit, wird der Begriff „gesamtes CO₂-Budget“ genutzt; bezieht man sich auf [die kumulativen Emissionen seit] einem bestimmten Datum in der nahen Vergangenheit, wird dies als „verbleibendes CO₂-Budget“ bezeichnet (Glossar). Die historischen kumulierten CO₂-Emissionen bestimmen zu einem großen Teil die bisherige Erwärmung, während künftige Emissionen zusätzliche Erwärmung in der Zukunft verursachen. Das verbleibende CO₂-Budget gibt an, wie viel CO₂ noch emittiert werden könnte, um die Erwärmung unter einem bestimmten Temperaturniveau zu halten.

Every tonne of CO₂ emissions adds to global warming

Global surface temperature increase since 1850–1900 (°C) as a function of cumulative CO₂ emissions (GtCO₂)

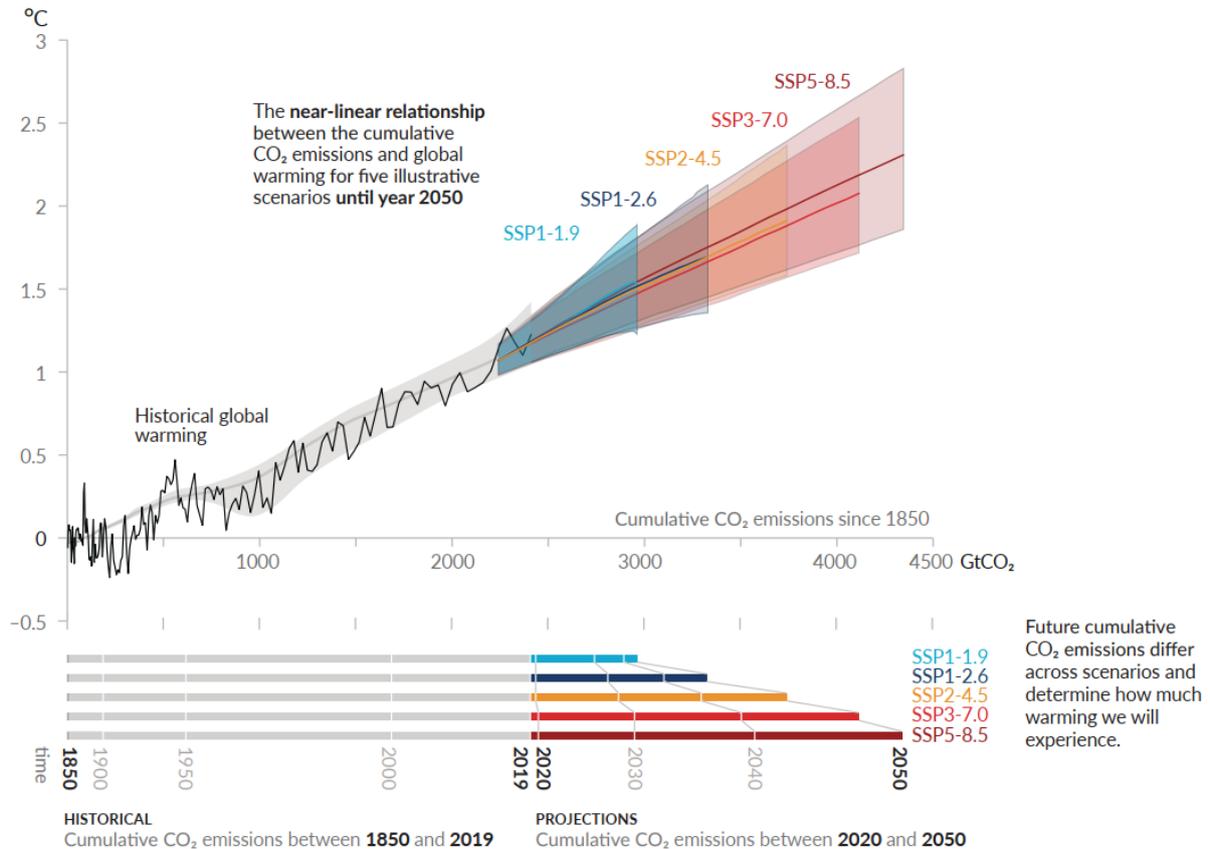


Abbildung SPM.10 | Nahezu lineare Beziehung zwischen den kumulativen CO₂-Emissionen und dem Anstieg der globalen Oberflächentemperatur

Obere Tafel: Historische Daten (dünne schwarze Linie) zeigen den beobachteten Anstieg der globalen Oberflächentemperatur in °C seit 1850–1900 als Funktion der historischen kumulativen Kohlendioxid (CO₂)-Emissionen in Gt CO₂ von 1850 bis 2019. Der graue Bereich mit seiner Mittellinie zeigt eine entsprechende Berechnung der historischen, vom Menschen verursachten Oberflächenerwärmung (siehe Abbildung SPM.2). Die farbigen Bereiche zeigen die bewertete *sehr wahrscheinliche* Bandbreite an Projektionen der globalen Oberflächentemperatur, und die dicken farbigen Mittellinien geben den Median als Funktion der kumulativen CO₂-Emissionen von 2020 bis zum Jahr 2050 für die verschiedenen illustrativen Szenarien (SSP1-1.9, SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 und SSP5-8.5, siehe Abbildung SPM.4) an. Für die Projektionen werden die kumulativen CO₂-Emissionen des jeweiligen Szenarios verwendet, und die projizierte globale Erwärmung umfasst den Beitrag aller anthropogenen Antriebsfaktoren. Die Beziehung ist für denjenigen Bereich an kumulativen CO₂-Emissionen dargestellt, für den *hohes Vertrauen* darin besteht, dass die vorübergehende Reaktion des Klimas auf kumulative CO₂-Emissionen (*transient climate response to cumulative CO₂ emissions*, TCRE) konstant bleibt, sowie für den Zeitraum von 1850 bis 2050, über den die globalen CO₂-Emissionen bei allen illustrativen Szenarien netto positiv bleiben, da es nur *begrenzte Belege* für die quantitative Anwendung des TCRE-Konzepts zur Abschätzung der Temperaturentwicklung bei netto negativen CO₂-Emissionen gibt.

Untere Tafel: Historische und projizierte kumulative CO₂-Emissionen in Gt CO₂ für die jeweiligen Szenarien.

{Abschnitt 5.5, Abbildung 5.31, Abbildung TS.18}

Tabelle SPM.2 | Bezifferung von historischen CO₂-Emissionen und verbleibender CO₂-Budgets. Die verbleibenden CO₂-Budgets wurden ab Anfang 2020 berechnet und erstrecken sich bis zu dem Zeitpunkt, an dem globale CO₂-Emissionen von netto Null erreicht werden. Sie beziehen sich auf CO₂-Emissionen, wobei die globale Erwärmung durch Nicht-CO₂-Emissionen berücksichtigt wird. Mit globaler Erwärmung ist in dieser Tabelle der vom Menschen verursachte Anstieg der globalen Oberflächentemperatur gemeint, was die Folgen natürlicher Schwankungen auf die globalen Temperaturen in einzelnen Jahren nicht mit einschließt.

{Tabelle 3.1, 5.5.1, 5.5.2, Box 5.2, Tabelle 5.1, Tabelle 5.7, Tabelle 5.8, Tabelle TS.3}

Globale Erwärmung zwischen 1850–1900 und 2010–2019 (°C)		Historische kumulative CO ₂ -Emissionen von 1850 bis 2019 (Gt CO ₂)					
1,07 (0,8–1,3; <i>wahrscheinliche</i> Bandbreite)		2390 (± 240; <i>wahrscheinliche</i> Bandbreite)					
Ungefähre globale Erwärmung gegenüber 1850–1900 bis zur Temperaturobergrenze (°C) ^a	Zusätzliche globale Erwärmung gegenüber 2010–2019 bis zur Temperaturobergrenze (°C)	Ermittelte verbleibende CO ₂ -Budgets ab Anfang 2020 (Gt CO ₂)					Variationen bei Minderungen von Nicht-CO ₂ -Emissionen ^c
		<i>Wahrscheinlichkeit, dass die globale Erwärmung auf die Temperaturobergrenze begrenzt wird^b</i>					
		17 %	33 %	50 %	67 %	83 %	
1,5	0,43	900	650	500	400	300	Höhere oder geringere Minderungen von begleitenden Nicht-CO ₂ -Emissionen können die Werte links um mindestens 220 Gt CO ₂ erhöhen oder verringern
1,7	0,63	1450	1050	850	700	550	
2,0	0,93	2300	1700	1350	1150	900	

^a Werte für jeden 0,1 °C-Erwärmungsschritt sind in den Tabellen TS.3 und 5.8 verfügbar.

^b Diese Wahrscheinlichkeit basiert auf der Unsicherheit der vorübergehenden Reaktion des Klimas auf kumulative CO₂-Emissionen (*transient climate response to cumulative CO₂ emissions*, TCRE) und zusätzlichen Rückkopplungen des Erdsystems und gibt die Wahrscheinlichkeit dafür an, dass die globale Erwärmung die in den beiden linken Spalten angegebenen Temperaturwerte nicht überschreiten wird. Unsicherheiten bezüglich der historischen Erwärmung (±550 Gt CO₂) sowie des Nicht-CO₂-Antriebs und der dazugehörigen Reaktion des Klimas (±220 Gt CO₂) werden teilweise durch die bewertete TCRE-Unsicherheit adressiert; Unsicherheiten bezüglich der jüngsten Emissionen seit 2015 (±20 Gt CO₂) und der Reaktion des Klimas nach Erreichen von netto null Emissionen (±420 GtCO₂) sind jedoch gesondert zu betrachten.

^c Angaben zu verbleibenden CO₂-Budgets berücksichtigen die Erwärmung durch Nicht-CO₂-Antriebsfaktoren wie in den in SR1.5 bewerteten Szenarien zugrunde gelegt. Der Beitrag von Arbeitsgruppe III zum AR6 wird die Minderung von Nicht-CO₂-Emissionen bewerten.

D.1.3 Mehrere Faktoren, die die Bezifferung des verbleibenden CO₂-Budgets bestimmen, wurden neu bewertet, wobei die Aktualisierungen dieser Faktoren gegenüber SR1.5 gering sind. Bereinigt um die Emissionen seit früheren Berichten sind die Angaben zu verbleibenden CO₂-Budgets daher von ähnlicher Größenordnung wie bei SR1.5, aber aufgrund methodischer Verbesserungen größer als beim AR5⁴⁴.
{5.5, Box 5.2, TS.3.3} (Tabelle SPM.2)

⁴⁴ Angaben im AR6 zum verbleibenden CO₂-Budget, das mit einer Begrenzung der Erwärmung auf 1,5 °C vereinbar ist, liegen gegenüber dem AR5 und unter Berücksichtigung von Emissionen seit AR5 um etwa 300–350 Gt CO₂ höher; für 2 °C beträgt die Differenz etwa 400–500 Gt CO₂.

- D.1.4 Anthropogene CO₂-Entnahme (*carbon dioxide removal, CDR*) hat das Potenzial, CO₂ aus der Atmosphäre zu entfernen und dauerhaft in Reservoirs zu speichern (*hohes Vertrauen*). CDR zielt darauf ab, verbleibende Emissionen zu kompensieren, um netto null CO₂-Emissionen oder netto null Treibhausgasemissionen zu erreichen, oder – wenn in einem Umfang umgesetzt, in dem die anthropogene Entnahme die anthropogenen Emissionen übersteigt – die Oberflächentemperatur zu senken. CDR-Methoden können potenziell weitreichende Auswirkungen auf biogeochemische Kreisläufe und das Klima haben, die das Potenzial dieser Methoden zur CO₂-Entnahme und zur Verringerung der Erwärmung entweder abschwächen oder verstärken können; sie können auch die Verfügbarkeit und Qualität von Wasser, die Nahrungsmittelproduktion sowie die biologische Vielfalt beeinflussen⁴⁵ (*hohes Vertrauen*).
{5.6, Cross-Chapter Box 5.1, TS.3.3}
- D.1.5 Anthropogene CO₂-Entnahme (*carbon dioxide removal, CDR*), die zu globalen netto-negativen Emissionen führt, würde die atmosphärische CO₂-Konzentration senken und die Ozeanversauerung umkehren (*hohes Vertrauen*). Anthropogene CO₂-Entnahmen und -Emissionen werden teilweise durch CO₂-Freisetzung beziehungsweise -Aufnahme aus oder in Kohlenstoffspeicher an Land und im Ozean kompensiert (*sehr hohes Vertrauen*). CDR würde das atmosphärische CO₂ um einen Betrag senken, der in etwa dem Anstieg durch eine anthropogene Emission derselben Größenordnung entspricht (*hohes Vertrauen*). Der atmosphärische CO₂-Rückgang durch anthropogene CO₂-Entnahmen könnte bis zu 10 % geringer sein als der atmosphärische CO₂-Anstieg durch CO₂-Emissionen in gleicher Höhe, je nach Gesamtmenge an CDR (*mittleres Vertrauen*).
{5.3, 5.6, TS.3.3}
- D.1.6 Wenn globale netto-negative CO₂-Emissionen erreicht und aufrechterhalten würden, würde sich der globale CO₂-bedingte Anstieg der Oberflächentemperatur allmählich umkehren, aber andere Klimaänderungen würden über Jahrzehnte bis Jahrtausende in ihrer derzeitigen Richtung weiterlaufen (*hohes Vertrauen*). So würde es beispielsweise selbst bei umfangreichen netto-negativen CO₂-Emissionen mehrere Jahrhunderte bis Jahrtausende dauern, bis der mittlere globale Meeresspiegel zurückgehen würde (*hohes Vertrauen*).
{4.6, 9.6, TS.3.3}
- D.1.7 In den fünf illustrativen Szenarien führen gleichzeitige Änderungen der Emissionen von CH₄, Aerosolen und Ozonvorläufersubstanzen, die auch zur Luftverschmutzung beitragen, in naher Zukunft und langfristig zu einer Nettoerwärmung der globalen Erdoberfläche (*hohes Vertrauen*). Langfristig ist diese Nettoerwärmung in Szenarien, die Luftreinhaltungsmaßnahmen in Verbindung mit starken und anhaltenden Verringerungen der CH₄-Emissionen als Annahme beinhalten, geringer (*hohes Vertrauen*). In den Szenarien mit niedrigen und sehr niedrigen Treibhausgasemissionen führen die angenommenen Verringerungen anthropogener Aerosolemissionen zu einer Nettoerwärmung, während Verringerungen der Emissionen von CH₄ und anderen Ozonvorläufersubstanzen zu einer Nettoabkühlung führen. Aufgrund der kurzen Lebensdauer sowohl von CH₄ als auch von Aerosolen gleichen sich diese Klimaeffekte teilweise gegenseitig aus, und Verringerungen

⁴⁵ Potenzielle negative und positive Auswirkungen von CDR auf die biologische Vielfalt, auf Wasser und die Nahrungsmittelproduktion sind methodenspezifisch und hängen oft stark vom lokalen Kontext, der Bewirtschaftung, der vorherigen Landnutzung und der Größenordnung ab. Die IPCC-Arbeitsgruppen II und III bewerten das CDR-Potenzial sowie die ökologischen und sozioökonomischen Auswirkungen von CDR-Methoden in ihren Beiträgen zum AR6.

von CH₄-Emissionen tragen auch zur Verbesserung der Luftqualität bei, indem sie die globalen Ozonkonzentrationen an der Erdoberfläche reduzieren (*hohes Vertrauen*).

{6.7, Box TS.7} (Abbildung SPM.2, Box SPM.1)

- D.1.8 Das Erreichen von globalen netto null CO₂-Emissionen, wobei anthropogene CO₂-Emissionen durch anthropogene Entnahmen von CO₂ ausgeglichen werden, ist eine Voraussetzung für die Stabilisierung des CO₂-bedingten Anstiegs der globalen Oberflächentemperatur. Dies unterscheidet sich von der Erreichung von netto null Treibhausgasemissionen, bei denen mittels einer Metrik gewichteten anthropogenen Treibhausgasemissionen gleich den mittels dieser Metrik gewichteten anthropogenen Treibhausgasentnahmen sind. Für einen bestimmten Treibhausgasemissionspfad bestimmen die Pfade der einzelnen Treibhausgase die resultierende Klimaänderung⁴⁶, während die Wahl der Emissionsmetrik⁴⁷, die zur Berechnung der aggregierten Emissionen und Entnahmen verschiedener Treibhausgase verwendet wird, den Zeitpunkt beeinflusst, zu dem die aggregierten Treibhausgase als netto Null berechnet werden. Emissionspfade, die netto null Treibhausgasemissionen erreichen und aufrechterhalten, welche durch das auf 100 Jahre bezogene globale Erwärmungspotenzial definiert sind, werden laut Projektionen nach einem vorangehenden Höchststand zu einem Rückgang der Oberflächentemperatur führen (*hohes Vertrauen*).
- {4.6, 7.6, Box 7.3, TS.3.3}

- D.2 Szenarien mit niedrigen oder sehr niedrigen Treibhausgasemissionen (SSP1-1.9 und SSP1-2.6) führen im Vergleich zu Szenarien mit hohen und sehr hohen Treibhausgasemissionen (SSP3-7.0 oder SSP5-8.5) innerhalb von Jahren zu erkennbaren Auswirkungen auf die Treibhausgas- und Aerosolkonzentrationen sowie die Luftqualität. Bei einem Vergleich dieser gegensätzlichen Szenarien beginnen sich erkennbare Unterschiede zwischen den Trends der globalen Oberflächentemperatur innerhalb von etwa 20 Jahren von der natürlichen Variabilität abzuheben, bei vielen anderen CIDs erst über längere Zeiträume hinweg (*hohes Vertrauen*).**
- {4.6, 6.6, 6.7, Cross-Chapter Box 6.1, 9.6, 11.2, 11.4, 11.5, 11.6, Cross-Chapter Box 11.1, 12.4, 12.5} (Abbildung SPM.8, Abbildung SPM.10)**

- D.2.1 Emissionssenkungen im Jahr 2020 in Verbindung mit Maßnahmen zur Verringerung der Ausbreitung von COVID-19 führten zu vorübergehenden, aber nachweisbaren Auswirkungen auf die Luftverschmutzung (*hohes Vertrauen*) und zu einem damit verbundenen kleinen, vorübergehenden Anstieg des gesamten Strahlungsantriebs, der in erster Linie auf die Verringerung der Abkühlung durch Aerosole aus menschlichen Aktivitäten zurückzuführen ist (*mittleres Vertrauen*). Globale und regionale Reaktionen des Klimas auf diesen vorübergehenden Antrieb sind jedoch nicht über die natürliche Variabilität hinaus nachweisbar (*hohes*

⁴⁶ Ein allgemeiner Begriff dafür, wie das Klimasystem auf einen Strahlungsantrieb reagiert (siehe Glossar).

⁴⁷ Die Wahl der Emissionsmetrik hängt von der Zielsetzung ab, für die die Gase oder klimawirksamen Stoffe verglichen werden sollen. Dieser Bericht enthält aktualisierte Werte für Emissionsmetriken und bewertet neue Ansätze zur Aggregation von Gasen.

Vertrauen). Die atmosphärischen CO₂-Konzentrationen stiegen in 2020 weiter an, ohne nachweisbaren Rückgang der beobachteten CO₂-Wachstumsrate (*mittleres Vertrauen*)⁴⁸.

{Cross-Chapter Box 6.1, TS.3.3}

- D.2.2 Verringerungen von Treibhausgasemissionen führen auch zu einer Verbesserung der Luftqualität. In der nahen Zukunft⁴⁹ reichen diese Verbesserungen jedoch selbst in Szenarien mit starker Reduzierung der Treibhausgasemissionen, wie in den Szenarien mit niedrigen und sehr niedrigen Treibhausgasemissionen (SSP1-2.6 und SSP1-1.9), in vielen verschmutzten Regionen nicht aus, um die von der Weltgesundheitsorganisation festgelegten Luftqualitätsrichtlinien zu erreichen (*hohes Vertrauen*). Szenarien mit gezielten Verringerungen von Luftschadstoffemissionen führen im Vergleich zur Verringerung von ausschließlich Treibhausgasemissionen zu einer schnelleren Verbesserung der Luftqualität innerhalb weniger Jahre. Ab 2040 werden in Szenarien, die Bemühungen zur Verminderung von Luftverschmutzung und von Treibhausgasemissionen kombinieren, weitere Verbesserungen projiziert, wobei das Ausmaß des Vorteils je nach Region variiert (*hohes Vertrauen*).
{6.6, 6.7, Box TS.7}.
- D.2.3 Szenarien mit sehr niedrigen oder niedrigen Treibhausgasemissionen (SSP1-1.9 und SSP1-2.6) würden im Vergleich zu Szenarien mit hohen oder sehr hohen Treibhausgasemissionen (SSP3-7.0 oder SSP5-8.5) rasch und anhaltend zur Begrenzung des vom Menschen verursachten Klimawandels beitragen; frühe Reaktionen des Klimasystems können jedoch durch natürliche Variabilität überdeckt werden. Bei der globalen Oberflächentemperatur würden sich Unterschiede in den 20-Jahres-Trends bei einem Szenario mit sehr niedrigen Treibhausgasemissionen (SSP1-1.9) gegenüber einem Szenario mit hohen oder sehr hohen Treibhausgasemissionen (SSP3-7.0 oder SSP5-8.5) *wahrscheinlich* in naher Zukunft zeigen. Die Reaktion vieler anderer Klimavariablen würde sich von der natürlichen Variabilität zu unterschiedlichen Zeitpunkten später im 21. Jahrhundert abheben (*hohes Vertrauen*).
{4.6, Cross-Section Box TS.1} (Abbildung SPM.8, Abbildung SPM.10)
- D.2.4 Szenarien mit sehr niedrigen und niedrigen Treibhausgasemissionen (SSP1-1.9 und SSP1-2.6) würden nach 2040 zu wesentlich geringeren Veränderungen bei einer Reihe von CIDs³⁶ führen als in Szenarien mit hohen und sehr hohen Treibhausgasemissionen (SSP3-7.0 und SSP5-8.5). Bis zum Ende des Jahrhunderts würden Szenarien mit sehr niedrigen und niedrigen Treibhausgasemissionen die Veränderung mehrerer CIDs – wie zum Beispiel die Häufigkeitszunahme von extremen Meeresspiegelereignissen, von Starkniederschlägen und Überschwemmungen infolge von Niederschlägen sowie der Überschreitung gefährlicher Hitzeschwellenwerte – im Vergleich zu Szenarien mit höheren Treibhausgasemissionen stark begrenzen und gleichzeitig die Anzahl der Regionen einschränken, in denen solche Überschreitungen auftreten (*hohes Vertrauen*). Veränderungen wären auch bei sehr niedrigen Treibhausgasemissionsszenarien geringer als in niedrigen, sowie bei mittleren (SSP2-4.5) im Vergleich zu hohen oder sehr hohen Treibhausgasemissionsszenarien (*hohes Vertrauen*).
{9.6, 11.2, 11.3, 11.4, 11.5, 11.6, 11.9, Cross-Chapter Box 11.1, 12.4, 12.5, TS.4.3}

⁴⁸ Für andere Treibhausgase gab es zum Zeitpunkt der Bewertung nicht genügend Literatur, um nachweisbare Änderungen ihrer atmosphärischen Wachstumsrate im Jahr 2020 zu bewerten.

⁴⁹ Nahe Zukunft (*near term*): 2021–2040