



ipcc

ZWISCHENSTAATLICHER AUSSCHUSS FÜR Klimaänderung

# KLIMAÄNDERUNG 2013

## *Wissenschaftliche Grundlagen*

## ZUSAMMENFASSUNG FÜR POLITISCHE ENTSCHEIDUNGSTRÄGER

AGI

BEITRAG DER ARBEITSGRUPPE I ZUM FÜNFTEN  
SACHSTANDSBERICHT DES ZWISCHENSTAATLICHEN  
AUSSCHUSSES FÜR KLIMAÄNDERUNG (IPCC)







# Klimaänderung 2013

## Wissenschaftliche Grundlagen

### Beitrag der Arbeitsgruppe I zum Fünften Sachstandsbericht des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderung (IPCC)

## Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger

Redaktionell bearbeitet von

**Thomas F. Stocker**

Ko-Vorsitzender der Arbeitsgruppe I  
Universität Bern

**Dahe Qin**

Ko-Vorsitzender der Arbeitsgruppe I  
Chinesischer Wetterdienst

**Gian-Kasper Plattner**

Wissenschaftlicher Direktor

**Melinda M.B. Tignor**

Organisatorische Leiterin

**Simon K. Allen**

Leitender Wissenschaft-  
licher Mitarbeiter

**Judith Boschung**

Verwaltungsassistentin

**Alexander Nauels**

Wissenschaftlicher Assistent

**Yu Xia**

Wissenschaftliche Mitarbeiterin

**Vincent Bex**

IT-Verantwortlicher

**Pauline M. Midgley**

Leiterin

**Geschäftsstelle der Arbeitsgruppe I**

**Deutsche Übersetzung herausgegeben von**

**sc | nat** 

Swiss Academy of Sciences  
Akademie der Naturwissenschaften  
Accademia di scienze naturali  
Académie des sciences naturelles

ProClim–  
Forum for Climate and Global Change



**umwelt**bundesamt<sup>u</sup>

IPCC 2013. Klimaänderung 2013: Wissenschaftliche Grundlagen.  
Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger

## Englisches Original

© 2013 Intergovernmental Panel on Climate Change

IPCC, 2013: Summary for Policy Makers. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.

Herausgegeben von:

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

Elektronische Versionen der englischen Originalversion dieses Dokuments sind auf der IPCC-Webseite unter [www.ipcc.ch](http://www.ipcc.ch) und auf der Webseite der IPCC-Arbeitsgruppe I unter [www.climatechange2013.org](http://www.climatechange2013.org) erhältlich.

## Deutsche Übersetzung

Als UN-Gremium veröffentlicht der IPCC seine Berichte nur in den sechs offiziellen UN-Sprachen.

Übersetzungen in allen UN-Sprachen (Arabisch, Chinesisch, Englisch, Französisch, Russisch, Spanisch) sind erhältlich.

Sie können unter <http://www.climatechange2013.org/report/wgi-ar5-translations/> und auf der IPCC-Webseite unter <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/> heruntergeladen werden.

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

Übersetzung: Urs Neu

Mitarbeit: Klaus Radunsky, Sachiko Ito, Pauline Midgley, Esther Volken, Thomas Stocker

Original-Layout: Michael Shibao (Smudgeworks)

Herausgeber: Deutsche IPCC-Koordinierungsstelle  
Projektträger im DLR  
Umwelt, Kultur, Nachhaltigkeit  
Heinrich-Konen-Straße 1  
D-53227 Bonn

Mitfinanzierung: Deutsches Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)  
Deutsches Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB)  
Schweizerisches Bundesamt für Umwelt (BAFU)  
Österreichisches Umweltbundesamt

Zitierweise: IPCC, 2013: Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger. In: Klimaänderung 2013: Wissenschaftliche Grundlagen. Beitrag der Arbeitsgruppe I zum Fünften Sachstandsbericht des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderung (IPCC), Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (Hrsg.), Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 Seiten. Deutsche Übersetzung durch ProClim, Deutsche IPCC-Koordinierungsstelle, Österreichisches Umweltbundesamt, Bern/Wien/Bonn, 2014.

## Titelfoto:

Folgefonna Gletscher, Hochebene von Sørfjorden, Norwegen (60°03' N - 6°20' E) © Yann Arthus-Bertrand / Altitude.





# **Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger**





## Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger

### Autoren des Entwurfs:

Lisa V. Alexander (Australien), Simon K. Allen (Schweiz/Neuseeland), Nathaniel L. Bindoff (Australien), François-Marie Bréon (Frankreich), John A. Church (Australien), Ulrich Cubasch (Deutschland), Seita Emori (Japan), Piers Forster (GB), Pierre Friedlingstein (GB/Belgien), Nathan Gillett (Kanada), Jonathan M. Gregory (GB), Dennis L. Hartmann (USA), Eystein Jansen (Norwegen), Ben Kirtman (USA), Reto Knutti (Schweiz), Krishna Kumar Kanikicharla (Indien), Peter Lemke (Deutschland), Jochem Marotzke (Deutschland), Valérie Masson-Delmotte (Frankreich), Gerald A. Meehl (USA), Igor I. Mokhov (Russland), Shilong Piao (China), Gian-Kasper Plattner (Schweiz), Qin Dahe (China), Venkatachalam Ramaswamy (USA), David Randall (USA), Monika Rhein (Deutschland), Maisa Rojas (Chile), Christopher Sabine (USA), Drew Shindell (USA), Thomas F. Stocker (Schweiz), Lynne D. Talley (USA), David G. Vaughan (GB), Shang-Ping Xie (USA)

### Autoren mit Beiträgen zum Entwurf:

Myles R. Allen (GB), Olivier Boucher (Frankreich), Don Chambers (USA), Jens Hesselbjerg Christensen (Dänemark), Philippe Ciais (Frankreich), Peter U. Clark (USA), Matthew Collins (GB), Josefino C. Comiso (USA), Viviane Vasconcellos de Menezes (Australien/Brasilien), Richard A. Feely (USA), Thierry Fichefet (Belgien), Arlene M. Fiore (USA), Gregory Flato (Kanada), Jan Fuglestad (Norwegen), Gabriele Hegerl (GB/ Deutschland), Paul J. Hezel (Belgien/USA), Gregory C. Johnson (USA), Georg Kaser (Österreich/Italien), Vladimir Kattsov (Russland), John Kennedy (GB), Albert M. G. Klein Tank (Niederlande), Corinne Le Quéré (GB), Gunnar Myhre (Norwegen), Timothy Osborn (GB), Antony J. Payne (GB), Judith Perlwitz (USA), Scott Power (Australien), Michael Prather (USA), Stephen R. Rintoul (Australien), Joeri Rogelj (Schweiz/Belgien), Matilde Rusticucci (Argentinien), Michael Schulz (Deutschland), Jan Sedláček (Schweiz), Peter A. Stott (GB), Rowan Sutton (GB), Peter W. Thorne (USA/Norwegen/GB), Donald Wuebbles (USA)

### Diese Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger sollte zitiert werden als:

IPCC, 2013: Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger. In: *Klimawandel 2013: Wissenschaftliche Grundlagen. Beitrag der Arbeitsgruppe I zum Fünften Sachstandsbericht des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderung* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (Hrsg.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

## A. Einleitung

Der Beitrag der Arbeitsgruppe I zum Fünften Sachstandsbericht des IPCC berücksichtigt neue Erkenntnisse zum Klimawandel, basierend auf vielen unabhängigen wissenschaftlichen Analysen von Beobachtungen des Klimasystems, Paläoklima-Archiven, theoretischen Studien von Klimaprozessen und von Simulationen mit Klimamodellen. Er baut auf den Beiträgen der Arbeitsgruppe I zum Vierten Sachstandsbericht des IPCC (AR4) auf und gliedert spätere neue Forschungsergebnisse ein. Als Bestandteil des fünften Beurteilungszyklus bildet der IPCC Sonderbericht zum „Management des Risikos von Extremereignissen und Katastrophen zur Förderung der Anpassung an den Klimawandel“ (SREX) eine wichtige Basis für die Information über sich verändernde Wetter- und Klima-Extreme.

Diese Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger (SPM) folgt der Struktur des Berichts der Arbeitsgruppe I. Die Darstellung wird ergänzt durch eine Reihe von übergreifenden hervorgehobenen Schlussfolgerungen, die zusammengekommen eine prägnante Zusammenfassung ergeben. Die Hauptabschnitte beginnen mit einem kurzen Absatz in Kursivschrift, in welchem die methodischen Grundlagen der Bewertung beschrieben werden.

Der Gewissheitsgrad der wichtigsten Ergebnisse in diesem Bericht basiert auf der Einschätzung des zugrundeliegenden wissenschaftlichen Verständnisses durch das Autorenteam und wird als qualitatives Vertrauensniveau ausgedrückt (von *sehr gering* bis *sehr hoch*) und, wenn möglich, auch quantitativ mit einer Wahrscheinlichkeitsangabe (von *besonders unwahrscheinlich* bis *praktisch sicher*). Das Vertrauen in die Aussagekraft eines Befundes beruht auf der Art, Menge, Qualität und Konsistenz der Belege (z.B. Daten, Prozess-Verständnis, Theorie, Modelle, Expertenbeurteilung) sowie dem Grad der Übereinstimmung.<sup>1</sup> Wahrscheinlichkeitsabschätzungen als quantitative Unsicherheitsangaben zu einem Befund basieren auf einer statistischen Auswertung von Beobachtungen oder Modellresultaten, oder beidem, und auf Expertenbeurteilung.<sup>2</sup> Wo angebracht, werden Befunde auch als Tatsachenaussagen ohne Unsicherheitsangaben formuliert. (Siehe Kapitel 1 und Box TS.1 für nähere Angaben zur genauen Ausdrucksweise, die das IPCC zur Kommunikation von Unsicherheit benutzt).

Die Grundlage für substanzielle Abschnitte in dieser Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger ist in den Kapitelteilen des zugrundeliegenden Berichts und in der Technischen Zusammenfassung zu finden. Diese Referenzen sind in geschweiften Klammern aufgeführt.

## B. Beobachtete Änderungen im Klimasystem

*Beobachtungen des Klimasystems beruhen auf direkten Messungen und Fernerkundung durch Satelliten und andere Plattformen. Beobachtungen im globalen Maßstab aus der Zeit der instrumentellen Messungen begannen Mitte des 19. Jahrhunderts bezüglich Temperatur und anderen Messgrößen, wobei umfassendere und unterschiedliche Beobachtungsdatensätze in der Zeit von 1950 an verfügbar sind. Paläoklima-Rekonstruktionen dehnen einige Messreihen um Hunderte bis zu Millionen Jahre zurück aus. Zusammen bieten sie eine umfassende Sicht über die Schwankungen und Langzeit-Veränderungen in der Atmosphäre, dem Ozean, der Kryosphäre und der Landoberfläche.*

**Die Erwärmung des Klimasystems ist eindeutig, und viele dieser seit den 1950er Jahren beobachteten Veränderungen sind seit Jahrzehnten bis Jahrtausenden nie aufgetreten. Die Atmosphäre und der Ozean haben sich erwärmt, die Schnee- und Eismengen sind zurückgegangen, der Meeresspiegel ist angestiegen und die Konzentrationen der Treibhausgase haben zugenommen (siehe Abbildungen SPM.1, SPM.2, SPM.3 und SPM.4). (2.2, 2.4, 3.2, 3.7, 4.2–4.7, 5.2, 5.3, 5.5–5.6, 6.2, 13.2)**

<sup>1</sup> In dieser Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger werden für die Beschreibung der verfügbaren Belege die folgenden summarischen Ausdrücke verwendet: beschränkt, mittel oder robust; und für den Grad der Übereinstimmung: gering, mittel und hoch. Der Vertrauensgrad wird durch die fünf Ausdrücke *sehr gering*, *gering*, *mittel*, *hoch* und *sehr hoch* beschrieben und kursiv gesetzt, z.B. *mittleres Vertrauen*. Für eine bestimmte Belegs- und Übereinstimmungsangabe können unterschiedliche Vertrauensgrade angegeben werden, aber ein steigender Umfang an Belegen und Grad der Übereinstimmung sind mit zunehmendem Vertrauen verbunden (siehe Kapitel 1 und Box TS.1 für nähere Angaben).

<sup>2</sup> In dieser Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger werden für die Angabe der abgeschätzten Wahrscheinlichkeit eines Befundes oder Resultats die folgenden Ausdrücke verwendet: *praktisch sicher* 99–100% Wahrscheinlichkeit, *sehr wahrscheinlich* 90–100%, *wahrscheinlich* 66–100%, ebenso *wahrscheinlich wie nicht* 33–66%, *unwahrscheinlich* 0–33%, *sehr unwahrscheinlich* 0–10%, *besonders unwahrscheinlich* 0–1%. Zusätzliche Ausdrücke (*äußerst wahrscheinlich* 95–100%, *eher wahrscheinlich* als nicht >50–100% und *äußerst unwahrscheinlich* 0–5%) können auch verwendet werden, falls angebracht. Die abgeschätzte Wahrscheinlichkeit ist kursiv gesetzt, z.B. *sehr wahrscheinlich* (siehe Kapitel 1 und Box TS.1 für nähere Angaben).



## B.1 Atmosphäre

**Jedes der letzten drei Jahrzehnte war an der Erdoberfläche sukzessive wärmer als alle vorangehenden Jahrzehnte seit 1850 (siehe Abbildung SPM.1). In der Nordhemisphäre war 1983–2012 wahrscheinlich die wärmste 30-Jahr-Periode der letzten 1400 Jahre (mittleres Vertrauen). {2.4, 5.3}**

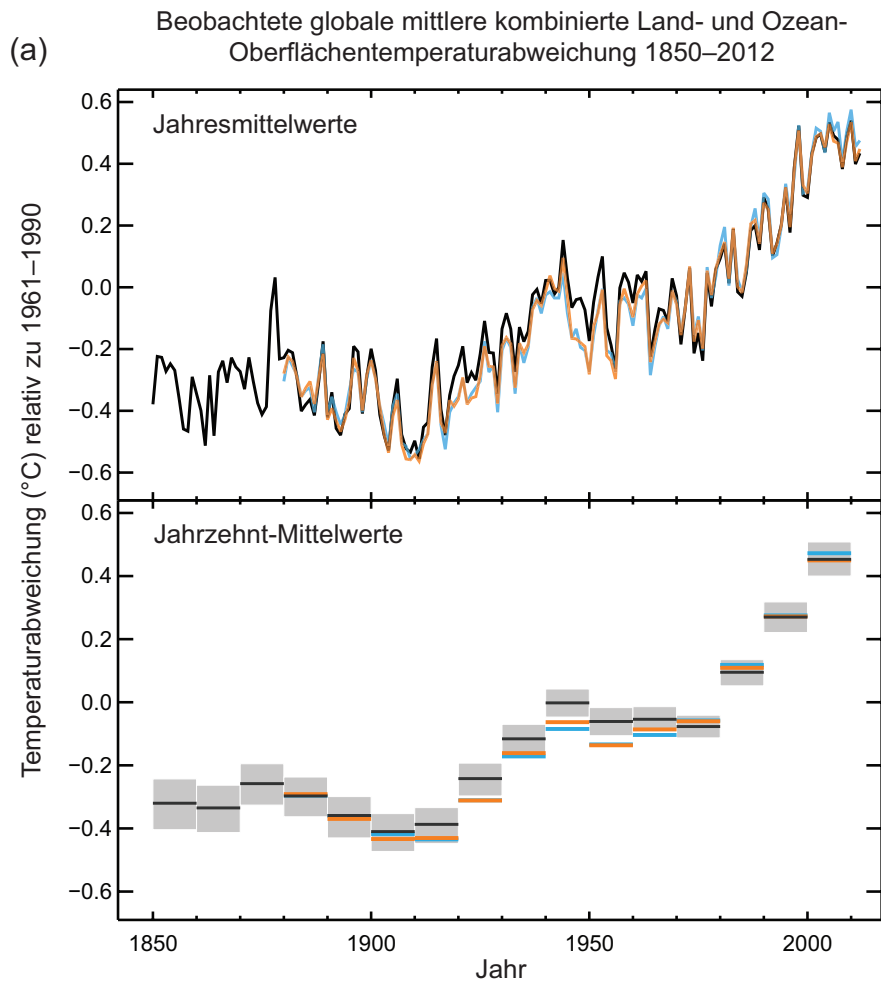
- Die global gemittelten kombinierten Land- und Ozean-Oberflächentemperaturdaten zeigen, berechnet als linearer Trend, einen Anstieg von 0.85 [0.65 bis 1.06] °C<sup>3</sup> über den Zeitraum 1880 bis 2012, für den mehrere unabhängig erstellte Datensätze vorliegen. Der gesamte Anstieg zwischen dem Mittel der Periode 1850–1900 und der Periode 2003–2012 ist 0.78 [0.72 bis 0.85] °C, basierend auf dem längsten verfügbaren Datensatz<sup>4</sup> (siehe Abbildung SPM.1a). {2.4}
- Im Verlauf des längsten Zeitraums, für welche die Berechnung von regionalen Trends ausreichend vollständig ist (1901–2012), hat sich fast die ganze Erdoberfläche erwärmt. (siehe Abbildung SPM.1b). {2.4}
- Zusätzlich zur robusten Erwärmung über mehrere Jahrzehnte zeigt die mittlere globale Erdoberflächentemperatur erhebliche Schwankungen im Bereich von Jahren und Jahrzehnten (siehe Abbildung SPM.1). Aufgrund der natürlichen Schwankungen sind auf kurzen Zeitreihen basierende Trends sehr empfindlich bezüglich der Start- und End-Daten und geben im Allgemeinen nicht den Langzeit-Klima-Trend wieder. Beispielsweise ist die Geschwindigkeit der Erwärmung über die letzten 15 Jahre (1998–2012; 0.05 [-0.05 bis +0.15] °C pro Jahrzehnt), die mit einem starken El Niño beginnt, kleiner als die seit 1951 berechnete Geschwindigkeit (1951–2012; 0.12 [0.08 bis 0.14] °C pro Jahrzehnt)<sup>5</sup>. {2.4}
- Im kontinentalen Maßstab zeigen Temperaturrekonstruktionen der mittelalterlichen Klima-Anomalie (Jahr 950 bis 1250) mit *hohem Vertrauen* Intervalle von mehreren Jahrzehnten, die in einigen Regionen so warm waren wie im späten 20. Jahrhundert. Diese regionalen Warmzeiten traten nicht so einheitlich über die Regionen hinweg auf wie die Erwärmung im späten 20. Jahrhundert (*hohes Vertrauen*). {5.5}
- Es ist *praktisch sicher*, dass sich die Troposphäre seit Mitte des 20. Jahrhunderts global erwärmt hat. Vollständigere Beobachtungen erlauben in der außertropischen Nordhemisphäre ein größeres Vertrauen in die Schätzungen der Temperaturänderungen in der Troposphäre als anderswo. Das *Vertrauen* in die Geschwindigkeit der Erwärmung und deren vertikale Struktur ist *mittel* für die außertropische Troposphäre der Nordhemisphäre und *gering* andernorts. {2.4}
- Das *Vertrauen* in die Niederschlagsänderungen gemittelt über die globalen Landflächen seit 1901 ist vor 1950 *gering* und danach *mittel*. Gemittelt über die Landflächen in den mittleren Breiten der Nordhemisphäre haben die Niederschläge seit 1901 zugenommen (*mittleres Vertrauen* vor 1951 und *hohes Vertrauen* danach). Für die flächengemittelten langfristigen positiven oder negativen Trends in anderen Breitengraden ist das *Vertrauen gering* (siehe Abbildung SPM.2). {TS.TFE.1 Abbildung 2; 2.5}
- Veränderungen in vielen extremen Wetter- und Klimaereignissen wurden seit ca. 1950 beobachtet (siehe Tabelle SPM.1 für Details). *Sehr wahrscheinlich* hat weltweit die Anzahl der kalten Tage und Nächte abgenommen und die Anzahl der warmen Tage und Nächte zugenommen.<sup>6</sup> *Wahrscheinlich* ist die Häufigkeit von Hitzewellen in weiten Teilen Europas, Asiens und Australiens angestiegen. Es gibt *wahrscheinlich* mehr Landregionen, in denen die Zahl der Starkniederschlagsereignisse zugenommen hat, als solche, wo diese abgenommen hat. Die Häufigkeit oder Intensität von Starkniederschlagsereignissen ist in Nordamerika und Europa *wahrscheinlich* angestiegen. In anderen Kontinenten ist das *Vertrauen* in Änderungen bei den Starkniederschlagsereignissen höchstens *mittel*. {2.6}

<sup>3</sup> Im Beitrag der Arbeitsgruppe I zum AR5 werden für die Quantifizierung der Unsicherheiten 90%-Unsicherheitsintervalle gebraucht, sofern nicht anders vermerkt. Die in eckigen Klammern aufgeführten 90%-Unsicherheitsintervalle entsprechen der Erwartung, dass der geschätzte Wert mit 90-prozentiger Wahrscheinlichkeit in diesem Intervall liegt. Unsicherheitsintervalle sind nicht notwendigerweise symmetrisch zur entsprechenden besten Schätzung. Eine beste Schätzung des Wertes ist, wenn vorhanden, ebenfalls aufgeführt.

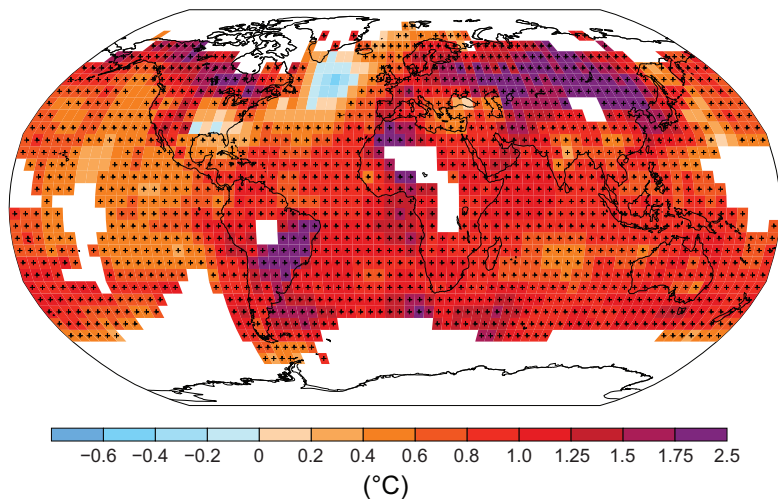
<sup>4</sup> Beide unter diesem Punkt präsentierten Methoden wurden auch im AR4 verwendet. Die erste berechnet die Differenz durch eine Ausgleichsgerade (linearer Trend) für alle Punkte zwischen 1880 und 2012. Die zweite berechnet die Differenz zwischen den Mitteln der beiden Perioden 1850–1900 und 2003–2012. Daher sind die berechneten Werte und ihre 90%-Unsicherheitsintervalle nicht direkt vergleichbar. {2.4}

<sup>5</sup> Die Trends für die 15-Jahres-Perioden mit Beginn in den Jahren 1995, 1996 und 1997 betragen 0.13 [0.02 bis 0.24] °C pro Jahrzehnt, 0.14 [0.03 bis 0.24] °C pro Jahrzehnt bzw. 0.07 [-0.02 bis 0.18] °C pro Jahrzehnt.

<sup>6</sup> Siehe Glossar für die Definition dieser Ausdrücke: Kalte Tage/kalte Nächte, warme Tage/warme Nächte, Hitzewellen.



(b) Beobachtete Veränderung der Oberflächentemperatur 1901–2012



**Abbildung SPM.1** | (a) Beobachtete globale mittlere kombinierte Land- und Ozean-Oberflächentemperaturabweichung von 1850 bis 2012 von drei Datensätzen. Obere Grafik: Jahresmittelwerte. Untere Grafik: Jahrzehnt-Mittelwerte, einschließlich der Einschätzung der Unsicherheit für einen Datensatz (schwarz). Die Abweichungen sind relativ zum Mittelwert von 1961–1990. (b) Karte der beobachteten Veränderungen der Erdoberflächentemperatur von 1901–2012, abgeleitet von Temperaturtrends, ermittelt aus der linearen Regression eines Datensatzes (orange Linie in Grafik a). Die Trends wurden dort berechnet, wo die Datenverfügbarkeit eine verlässliche Einschätzung erlaubt (d.h. nur für Gitterzellen mit Zeitreihen, die zu über 70% vollständig sind und mehr als 20% Datenverfügbarkeit in den ersten und letzten 10% der Zeitperiode). Andere Flächen sind weiß. Gitterzellen mit einem auf dem 10%-Niveau signifikanten Trend sind mit einem + Zeichen markiert. Für eine Liste der Datensätze und weitere technische Details siehe Zusatzmaterial der Technischen Zusammenfassung [Abbildungen 2.19–2.21; Abbildung TS.2].



**Tabelle SPM. 1 |** Extreme Wetter- und Klimaereignisse: Beurteilung auf globaler Ebene von kürzlich beobachteten Veränderungen, dem menschlichen Beitrag zu diesen Veränderungen sowie projizierte zukünftige Veränderungen für das frühe (2016–2035) und späte (2081–2100) 21. Jahrhundert. Fett zeigt an, wo AR5 (schwarz) eine gegenüber dem SREX (blau) oder AR4 (rot) angepasste\* Einschätzung auf dem globalen Maßstab angibt. Projektionen für das frühe 21. Jahrhundert wurden in vorangehenden Sachstandsberichten nicht aufgeführt. Projektionen im AR5 beziehen sich auf den Referenzzeitraum von 1986–2005 und verwenden die neuen Repräsentativen Konzentrationspfad-(RCP-)Szenarien (siehe Box SPM. 1), soweit nicht anders vermerkt. Siehe Glossar für die Definition von extremen Wetter- und Klimaereignissen.

Phänomen und Richtung des Trends	Beurteilung, dass Veränderungen auftraten (typischerweise nach 1950 sofern nicht anderweitig vermerkt)	Beurteilung des menschlichen Beitrags zur beobachteten Veränderung		Wahrscheinlichkeit von weiteren Veränderungen	
		Frühes 21. Jahrhundert	Spätes 21. Jahrhundert	Frühes 21. Jahrhundert	Spätes 21. Jahrhundert
Wärmere und/oder weniger kalte Tage und Nächte über den meisten Landflächen	Sehr wahrscheinlich Sehr wahrscheinlich Sehr wahrscheinlich	{2.6}	Sehr wahrscheinlich Wahrscheinlich Wahrscheinlich	Wahrscheinlich {11.3}	Praktisch sicher {12.4} Praktisch sicher Praktisch sicher
Wärmere und/oder häufigere heiße Tage und Nächte über den meisten Landflächen	Sehr wahrscheinlich Sehr wahrscheinlich Sehr wahrscheinlich	{2.6}	Sehr wahrscheinlich Wahrscheinlich Wahrscheinlich (nur nachts)	Wahrscheinlich {11.3}	Praktisch sicher {12.4} Praktisch sicher Praktisch sicher
Wärmeperioden/Hitzewellen. Zunahme der Häufigkeit und/oder Dauer über den meisten Landflächen	Mittleres Vertrauen auf der globalen Ebene Wahrscheinlich in großen Teilen Europas, Asiens und Australiens Mittleres Vertrauen in vielen (aber nicht in allen) Regionen Wahrscheinlich	{2.6}	Wahrscheinlich Wahrscheinlich Wahrscheinlich	Nicht formell bewertet {11.3}	Praktisch sicher {12.4} Praktisch sicher Praktisch sicher
Starkniederschlagsereignisse. Zunahme der Häufigkeit, Intensität und/oder der Niederschlagsmenge von Starkniederschlägen	Wahrscheinlich mehr Landflächen mit Zunahmen als mit Abnahmen <sup>c</sup> {2.6}	{2.6}	Mittleres Vertrauen {7.6, 10.6}	Wahrscheinlich über vielen Landflächen {11.3}	Sehr wahrscheinlich über einem Großteil der Landmassen der mittleren Breiten und über nassen tropischen Regionen {12.4} Wahrscheinlich über den meisten Landmassen Wahrscheinlich (mittleres Vertrauen) auf der regionalen bis zur globalen Skala <sup>h</sup> {12.4}
Zunahme der Intensität und/oder der Dauer von Dürren	Wahrscheinlich mehr Landflächen mit Zunahmen als mit Abnahmen Wahrscheinlich über den meisten Landflächen Geringes Vertrauen auf der globalen Ebene Wahrscheinlich Veränderungen in einigen Regionen <sup>d</sup> Mittleres Vertrauen in einigen Regionen Wahrscheinlich in vielen Regionen, seit 1970 <sup>e</sup>	{2.6}	Geringes Vertrauen {10.6}	Geringes Vertrauen <sup>f</sup> {11.3}	Mittleres Vertrauen in einigen Regionen Wahrscheinlich <sup>g</sup>
Zunahme der Intensität tropischer Zykone	Geringes Vertrauen in langfristige (hundertjährige) Veränderungen Praktisch sicher im Nordatlantik seit 1970 Geringes Vertrauen Wahrscheinlich in einigen Regionen, seit 1970	{2.6}	Geringes Vertrauen {10.6}	Geringes Vertrauen {11.3}	Eher wahrscheinlich als nicht im Wesentlichen Nordpazifik und im Nordatlantik {14.6} Eher wahrscheinlich als nicht in einigen Meeresbecken Wahrscheinlich
Zunahme des Auftretens und/oder des Ausmaßes von extrem hohem Meeresspiegel	Wahrscheinlich (seit 1970) Wahrscheinlich (spätes 20. Jahrhundert) Wahrscheinlich	{3.7}	Wahrscheinlich <sup>k</sup> Wahrscheinlich Eher wahrscheinlich als nicht <sup>k</sup>	Wahrscheinlich {13.7}	Sehr wahrscheinlich {13.7} Sehr wahrscheinlich <sup>m</sup> Wahrscheinlich

\* Der direkte Vergleich von Beurteilungsergebnissen zwischen den Berichten ist schwierig. Für einige Klimagrößen wurden unterschiedliche Aspekte beurteilt, und für den SREX und AR5 wurde der überarbeitete Leitfaden zu Unsicherheiten angewendet. Die Verfügbarkeit von neuen Informationen, verbessertes wissenschaftliches Verständnis, fortgesetzte Analysen von Daten und Modellen sowie spezifische Unterschiede zwischen den in den bewerteten Studien angewandten Methoden tragen alle zu den überarbeiteten Beurteilungsergebnissen bei.

Anmerkungen:

a Die Zuordnung basiert auf verfügbaren Fallstudien. Es ist wahrscheinlich, dass der menschliche Einfluss die Eintrittswahrscheinlichkeit von einigen beobachteten Hitzewellen an einigen Orten mehr als verdoppelt hat.

b Modelle projizieren kurzfristige Anstiege in der Dauer, der Intensität und der räumlichen Ausdehnung von Hitzewellen und Wärmeperioden.

c In den meisten Kontinenten ist das Vertrauen in die Trends nicht höher als mittel, außer in Nordamerika und Europa, wo entweder die Häufigkeit oder die Intensität von Starkniederschlägen mit gewissen jahreszeitlichen und/oder regionalen Variationen wahrscheinlich zugenommen hat. Zunahmen im zentralen Nordamerika sind sehr wahrscheinlich.

d Die Häufigkeit und Intensität von Dürren ist im Mittelmeerraum und in Westafrika wahrscheinlich angestiegen, im zentralen Nordamerika und in Nordwest-Australien wahrscheinlich zurückgegangen.

e AR4 beurteilte die von Dürren betroffene Fläche.

f Der SREX beurteilte die Zuordnung der Veränderung von Dürren auf der Ebene einzelner Regionen mit geringem Vertrauen.

g Das Vertrauen in die projizierten Veränderungen der Bodenfeuchtigkeit und zunehmende Agrar-Dürren sind für gegenwärtig trockene Regionen bis Ende dieses Jahrhunderts unter dem RCP8.5-Szenario wahrscheinlich (mittleres Vertrauen). Die Austrocknung der Bodenfeuchtigkeit im Mittelmeerraum, dem Südwesten der USA und in den Regionen im südlichen Afrika ist konsistent mit projizierten Änderungen der Hadley-Zirkulation und erhöhten Erdoberflächen- und Erdoberflächen-Temperaturen. Deshalb gibt es hohes Vertrauen in die wahrscheinliche Austrocknung der Erdoberfläche in diesen Regionen unter dem RCP8.5-Szenario bis Ende dieses Jahrhunderts.

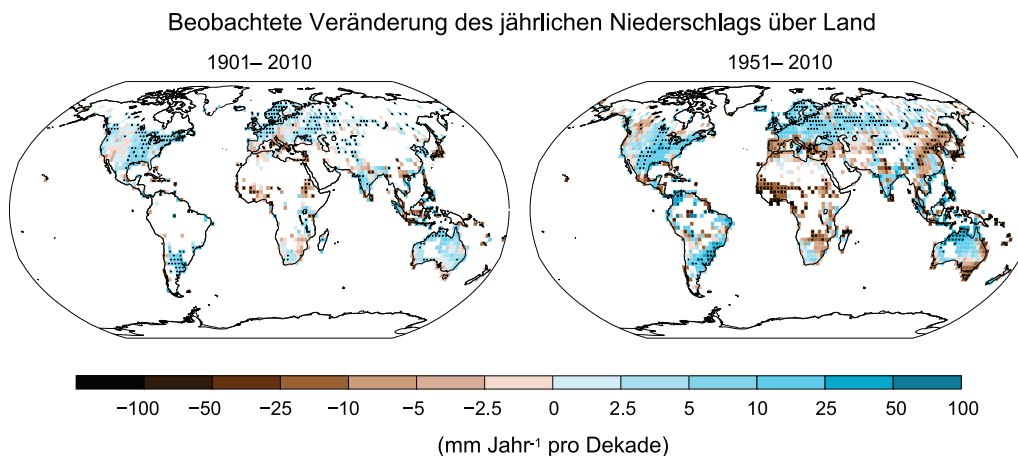
h Das Vertrauen ist mittel, dass eine Reduktion des Aerosol-Antriebs über dem Nordatlantik zumindest teilweise zum beobachteten Anstieg der Aktivität von tropischen Wirbelstürmen seit den 1970ern in dieser Region beigetragen hat.

i Basierend auf Expertenurteilen und der Beurteilung von Projektionen, die ein SRES-Szenario A1B (oder ein ähnliches) verwenden.

j Die Zuordnung basiert auf dem engen Zusammenhang zwischen den beobachteten Veränderungen im extremen und mittleren Meeresspiegel.

k Das Vertrauen ist hoch, dass dieser Anstieg der extrem hohen Meeresspiegel hauptsächlich durch einen Anstieg des mittleren Meeresspiegels zustande kommen wird. Das Vertrauen in die regions-spezifischen Projektionen von Stürmen und damit verbundenen Sturmfluten ist gering.

m Der SREX beurteilte es als sehr wahrscheinlich, dass der mittlere Meeresspiegelanstieg zu den zukünftigen Aufwärtstrends von extremen Hochwasserständen an den Küsten beitragen wird.



**Abbildung SPM.2** | Karten der beobachteten Niederschlagsänderungen von 1901 bis 2010 und von 1951 bis 2010 (die Trends der jährlichen Akkumulation wurden unter Verwendung der gleichen Kriterien wie in Abbildung SPM.1 berechnet) von einem Datensatz. Für weitere technische Details siehe Zusatzmaterial zur Technischen Zusammenfassung. {TS.TFE.1 Abbildung 2; Abbildung 2.29}

## B.2 Ozean

**Die Erwärmung des Ozeans dominiert den Zuwachs der im Klimasystem gespeicherten Energie und macht mehr als 90% der zwischen 1971 und 2010 akkumulierten Energie aus (hohes Vertrauen). Es ist praktisch sicher, dass sich der obere Ozean (0–700 m) von 1971 bis 2010 erwärmt hat, und wahrscheinlich, dass er auch zwischen 1870 und 1971 wärmer geworden ist. {3.2, Box 3.1}**

- Global gesehen ist die Erwärmung des Ozeans in der Nähe der Oberfläche am größten. Die obersten 75 m sind im Zeitraum von 1971 bis 2010 um 0.11 [0.09 bis 0.13] °C pro Jahrzehnt wärmer geworden. Seit dem AR4 wurden systematische instrumentelle Messfehler in den Temperaturaufzeichnungen des oberen Ozeans identifiziert und verringert, und dadurch das Vertrauen in die Beurteilung der Änderungen erhöht. {3.2}
- Es ist *wahrscheinlich*, dass sich der Ozean zwischen 700 und 2000 m Tiefe von 1957 bis 2009 erwärmt hat. Für den Zeitraum von 1992 bis 2005 sind ausreichend Beobachtungen für eine globale Beurteilung der Temperaturänderungen unterhalb von 2000 m verfügbar. Es gab *wahrscheinlich* keine signifikanten beobachteten Temperatur-Trends zwischen 2000 und 3000 m Tiefe in diesem Zeitraum. *Wahrscheinlich* hat sich der Ozean von 3000 m bis zum Meeresgrund in diesem Zeitraum erwärmt, mit der stärksten beobachteten Erwärmung im Südlichen Ozean. {3.2}
- Mehr als 60% des Netto-Energie-Zuwachses im Klimasystem ist während der relativ gut vermessenen 40-Jahres-Periode von 1971 bis 2010 im oberen Ozean (0–700 m) gespeichert, und etwa 30% im Ozean unterhalb von 700 m. Die aus dem linearen Trend geschätzte Zunahme des Wärmegehalts im oberen Ozean in diesem Zeitraum beträgt *wahrscheinlich* 17 [15 bis 19] x 10<sup>22</sup> J<sup>7</sup> (siehe Abbildung SPM.3). {3.2, Box 3.1}
- Es ist etwa *so wahrscheinlich wie nicht*, dass der Wärmegehalt des Ozeans von 0–700 m von 2003 bis 2010 langsamer zugenommen hat als von 1993 bis 2002 (siehe Abbildung SPM.3). Die Wärmeaufnahme im Ozean von 700–2000 m, wo die Schwankungen von Jahr zu Jahr kleiner sind, hat sich *wahrscheinlich* von 1993 bis 2009 unvermindert fortgesetzt (Abbildung SPM.2c). {3.2, Box 9.2}
- Es ist *sehr wahrscheinlich*, dass seit den 1950er Jahren Regionen mit hohem Salzgehalt, in denen Verdunstung dominiert, salziger geworden sind, während Regionen mit niedrigem Salzgehalt, in denen Niederschlag überwiegt, weniger salzig geworden sind. Diese regionalen Trends des Salzgehaltes der Ozeane sind ein indirekter Hinweis, dass sich Verdunstung und Niederschlag über den Ozeanen verändert haben (*mittleres Vertrauen*). {2.5, 3.3, 3.5}

<sup>7</sup> Eine konstante Versorgung mit Wärme durch die Ozeanoberfläche mit einer Rate von 1 W m<sup>-2</sup> für 1 Jahr würde den Wärmegehalt des Ozeans um 1.1 x 10<sup>22</sup> J erhöhen.

- Es gibt keine Hinweise aus Beobachtungen auf einen Trend in der Atlantischen Meridionalen Umwälzzirkulation (AMOC), basierend auf der jahrzehntelangen Aufzeichnung der kompletten AMOC und längeren Aufzeichnungen individueller AMOC-Komponenten. {3.6}

### B.3 Kryosphäre

**Während der letzten beiden Jahrzehnte haben die Eisschilde in Grönland und in der Antarktis an Masse verloren, die Gletscher sind fast überall in der Welt weiter abgeschmolzen, und die Ausdehnung des arktischen Meereises sowie der Schneebedeckung in der Nordhemisphäre im Frühjahr haben weiter abgenommen (*hohes Vertrauen*) (siehe Abbildung SPM.3). {4.2–4.7}**

- Die durchschnittliche Geschwindigkeit des Eisverlustes<sup>8</sup> von Gletschern weltweit, ausgenommen die Gletscher am Rande der Eisschilde<sup>9</sup>, betrug *sehr wahrscheinlich* 226 [91 bis 361] Gt pro Jahr im Zeitraum von 1971 bis 2009, und *sehr wahrscheinlich* 275 [140 bis 410] Gt pro Jahr im Zeitraum von 1993 bis 2009.<sup>10</sup> {4.3}
- Die durchschnittliche Geschwindigkeit des Eisverlustes des Grönländischen Eisschildes ist *sehr wahrscheinlich* beträchtlich von 34 [-6 bis 74] Gt pro Jahr im Zeitraum von 1992 bis 2001 auf 215 [157 bis 274] Gt pro Jahr im Zeitraum von 2002 bis 2011 angestiegen. {4.4}
- Die durchschnittliche Geschwindigkeit des Eisverlustes des Antarktischen Eisschildes ist *wahrscheinlich* von 30 [-37 bis 97] Gt pro Jahr im Zeitraum von 1992 bis 2001 auf 147 [72 bis 221] Gt pro Jahr im Zeitraum von 2002 bis 2011 angestiegen. Das *Vertrauen* ist *sehr hoch*, dass diese Verluste hauptsächlich von der nördlichen antarktischen Halbinsel und dem Amundsen-See-Sektor in der Westantarktis stammen. {4.4.2, 4.4.3}
- Die mittlere jährliche Ausdehnung des arktischen Meereises hat im Zeitraum von 1979 bis 2012 mit einer Geschwindigkeit abgenommen, die *sehr wahrscheinlich* im Bereich von 3.5 bis 4.1% pro Jahrzehnt lag (im Bereich von 0.45 bis 0.51 Millionen km<sup>2</sup> pro Jahrzehnt) und für das sommerliche Meereis-Minimum (ganzjähriges Meereis) *sehr wahrscheinlich* im Bereich von 9.4 bis 13.6% pro Jahrzehnt (im Bereich von 0.73 bis 1.07 Millionen km<sup>2</sup> pro Jahrzehnt). Die durchschnittliche Abnahme der mittleren dekadischen Ausdehnung des arktischen Meereises war im Sommer am stärksten (*hohes Vertrauen*); die Flächenausdehnung ist in jeder Jahreszeit und in jedem aufeinanderfolgenden Jahrzehnt seit 1979 zurückgegangen (*hohes Vertrauen*) (siehe Abbildung SPM.3). Aufgrund von Rekonstruktionen besteht *mittleres Vertrauen*, dass ein sommerlicher Eisrückgang in der Arktis wie in den letzten drei Jahrzehnten noch nie vorgekommen ist und die Zunahme der Meeresoberflächentemperaturen in zumindest den letzten 1450 Jahren außergewöhnlich hoch ist. {4.2, 5.5}
- *Sehr wahrscheinlich* hat die mittlere Ausdehnung des antarktischen Meereises zwischen 1979 und 2012 mit einer Geschwindigkeit im Bereich von 1.2 bis 1.8% pro Jahrzehnt (im Bereich von 0.13 bis 0.20 Millionen km<sup>2</sup> pro Jahrzehnt) zugenommen. Das *Vertrauen* ist *hoch*, dass es starke regionale Unterschiede in dieser jährlichen Geschwindigkeit gibt, mit einer Zunahme der Ausdehnung in einigen Regionen und einer Abnahme in anderen. {4.2}
- Das *Vertrauen* ist *sehr hoch*, dass die Ausdehnung der Schneebedeckung in der Nordhemisphäre seit Mitte des 20. Jahrhunderts abgenommen hat (siehe Abbildung SPM.3). Die Ausdehnung der Schneebedeckung auf der Nordhemisphäre hat im Zeitraum von 1967 bis 2012 um 1.6 [0.8 bis 2.4] % pro Jahrzehnt im März und April, und 11.7 [8.8 bis 14.6] % pro Jahrzehnt im Juni abgenommen. Während dieses Zeitraums zeigte die Ausdehnung der Schneebedeckung auf der Nordhemisphäre in keinem Monat einen statistisch signifikanten Anstieg. {4.5}
- Das *Vertrauen* ist *hoch*, dass die Permafrost-Temperaturen in den meisten Regionen seit den frühen 1980er Jahren angestiegen sind. Die beobachtete Erwärmung betrug bis zu 3 °C in Teilen des nördlichen Alaska (frühe 1980er bis Mitte der 2000er Jahre) und bis zu 2 °C in Teilen des russisch-europäischen (1971 bis 2010). In letzterer Region wurde im Zeitraum von 1975 bis 2005 ein beträchtlicher Rückgang der Permafrost-Dicke und -Flächenausdehnung festgestellt (*mittleres Vertrauen*). {4.7}
- Mehrere Indizienketten bestätigen eine erhebliche arktische Erwärmung seit Mitte des 20. Jahrhunderts. {Box 5.1, 10.3}

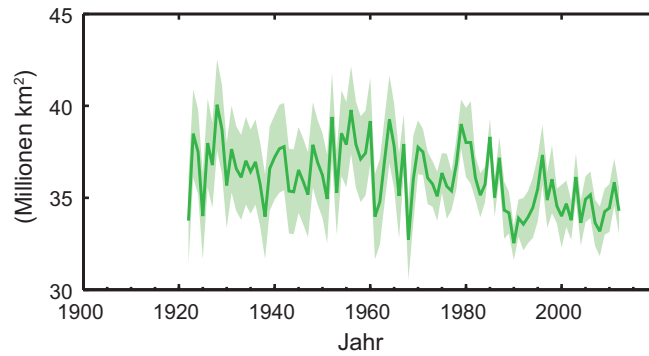
<sup>8</sup> Alle Verweise auf ‚Eisverlust‘ oder ‚Massenverlust‘ beziehen sich auf den Netto-Eisverlust, d.h. Akkumulation minus Schmelze und Eisberg-Kalbung.

<sup>9</sup> Aus methodischen Gründen enthält diese Beurteilung des Eisverlustes der Antarktischen und Grönländischen Eisschilde auch die Veränderung der Gletscher an der Peripherie. Diese Peripherie-Gletscher sind deshalb von den Werten für Gletscher ausgenommen.

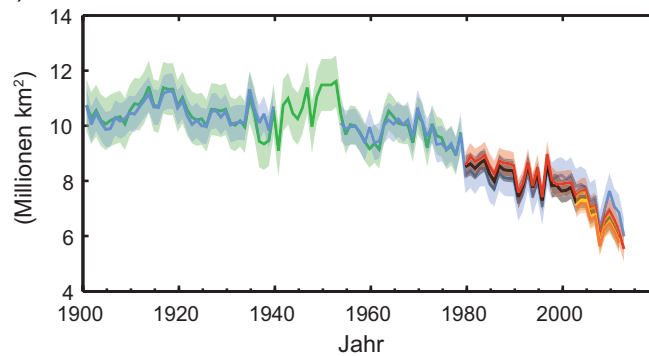
<sup>10</sup> Ein Eisverlust von 100 Gt pro Jahr entspricht etwa einem Anstieg des mittleren globalen Meeresspiegels von 0.28 mm pro Jahr.



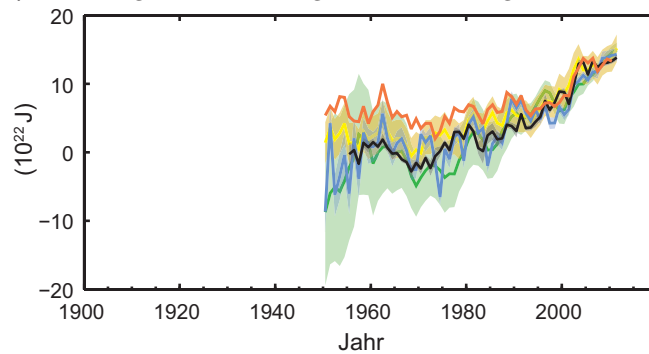
(a) Ausdehnung der Schneedecke auf der Nordhemisphäre im Frühjahr



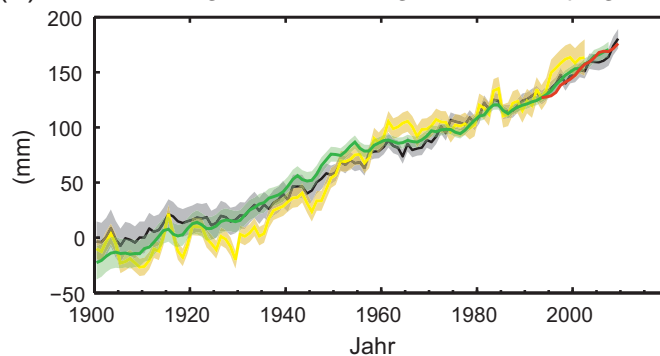
(b) Ausdehnung des arktischen Meereises im Sommer



(c) Änderung des mittleren globalen Wärmegehaltes im oberen Ozean



(d) Mittlere globale Änderung des Meeresspiegels



**Abbildung SPM.3** | Mehrfache beobachtete Indikatoren eines sich verändernden Klimas: (a) mittlere Ausdehnung der Schneedecke auf der Nordhemisphäre im März/April (Frühjahr), (b) mittlere Ausdehnung des Arktischen Meereises im Juli/August/September (Sommer), (c) Änderung des mittleren globalen Wärmegehaltes im oberen Ozean (0–700 m), abgestimmt auf 2006–2010 und bezogen auf das Mittel aller Datensätze von 1971, (d) mittlerer globaler Meeresspiegel bezogen auf das Mittel von 1900–1905 des längsten fortlaufenden Datensatzes und mit allen Datensätzen so abgeglichen, dass sie für 1993, dem ersten Jahr mit Satelliten-Höhenmessdaten, den gleichen Wert aufweisen. Alle Zeitreihen (die farbigen Linien repräsentieren unterschiedliche Datensätze) stellen Jahreswerte dar, und Unsicherheiten sind, sofern beurteilt, durch farbige Schattierungen angezeigt. Siehe Zusatzmaterial der Technischen Zusammenfassung für eine Auflistung der Datensätze. {Abbildungen 3.2, 3.13, 4.19 und 4.3; FAQ 2.1, Abbildung 2; Abbildung TS.1}

## B.4 Meeresspiegel

**Die Geschwindigkeit des Meeresspiegelanstiegs seit Mitte des 19. Jahrhunderts war größer als die mittlere Geschwindigkeit in den vorangegangenen zwei Jahrtausenden (*hohes Vertrauen*). Im Zeitraum 1901 bis 2010 ist der mittlere globale Meeresspiegel um 0.19 [0.17 bis 0.21] m gestiegen (siehe Abbildung SPM.3). {3.7, 5.6, 13.2}**

- Proxy- und instrumentelle Meeresspiegeldaten zeigen einen Übergang im späten 19. zum frühen 20. Jahrhundert von relativ geringen mittleren Anstiegsgeschwindigkeiten über die vorangegangenen zwei Jahrtausende zu höheren Anstiegsgeschwindigkeiten (*hohes Vertrauen*). *Wahrscheinlich* hat die Anstiegsgeschwindigkeit des mittleren globalen Meeresspiegels seit dem frühen 20. Jahrhundert weiter zugenommen. {3.7, 5.6, 13.2}
- Die durchschnittliche Anstiegsgeschwindigkeit des mittleren globalen Meeresspiegels betrug *sehr wahrscheinlich* 1.7 [1.5 bis 1.9] mm pro Jahr zwischen 1901 und 2010, 2.0 [1.7 bis 2.3] mm pro Jahr zwischen 1971 und 2010 und 3.2 [2.8 bis 3.6] mm pro Jahr zwischen 1993 und 2010. Pegelmessungen und Satelliten-Höhenmessdaten zeigen übereinstimmend eine höhere Anstiegsgeschwindigkeit im letzteren Zeitraum. *Wahrscheinlich* sind zwischen 1920 und 1950 ähnlich hohe Geschwindigkeiten aufgetreten. {3.7}
- Seit den frühen 1970er Jahren erklären der Gletscher-Massenverlust und die thermische Ausdehnung des Ozeans durch die Erwärmung zusammen ungefähr 75% des beobachteten mittleren globalen Meeresspiegelanstiegs (*hohes Vertrauen*). Im Zeitraum von 1993 bis 2010 stimmt der mittlere globale Meeresspiegelanstieg mit *hohem Vertrauen* mit der Summe der beobachteten Beiträge der thermischen Ausdehnung der Ozeane aufgrund der Erwärmung (1.1 [0.8 bis 1.4] mm pro Jahr), der Veränderungen der Gletscher (0.76 [0.39 bis 1.13] mm pro Jahr), des Grönländischen Eisschildes (0.33 [0.25 bis 0.41] mm pro Jahr), des Antarktischen Eisschildes (0.27 [0.16 bis 0.38] mm pro Jahr) und der Wasserspeicherung an Land (0.38 [0.26 bis 0.49] mm pro Jahr) überein. Die Summe dieser Beiträge ist 2.8 [2.3 bis 3.4] mm pro Jahr. {13.3}
- Es besteht *sehr hohes Vertrauen*, dass der maximale mittlere globale Meeresspiegel während der letzten Zwischeneiszeit (vor 129 000 bis 116 000 Jahren) über mehrere tausend Jahre mindestens 5 m höher lag als heute und *hohes Vertrauen*, dass er nicht mehr als 10 m höher lag als heute. Während der letzten Zwischeneiszeit trug der Grönländische Eisschild *sehr wahrscheinlich* zwischen 1.4 und 4.3 m zum höheren mittleren globalen Meeresspiegel bei, was mit *mittlerem Vertrauen* einen zusätzlichen Beitrag des Antarktischen Eisschildes voraussetzt. Diese Änderung des Meeresspiegels trat im Zusammenhang mit einem Antrieb durch veränderte Erdbahneigenschaften und mit Oberflächentemperaturen in hohen Breiten, die, gemittelt über mehrere tausend Jahre, mindestens 2 °C wärmer waren als heute, auf (*hohes Vertrauen*). {5.3, 5.6}

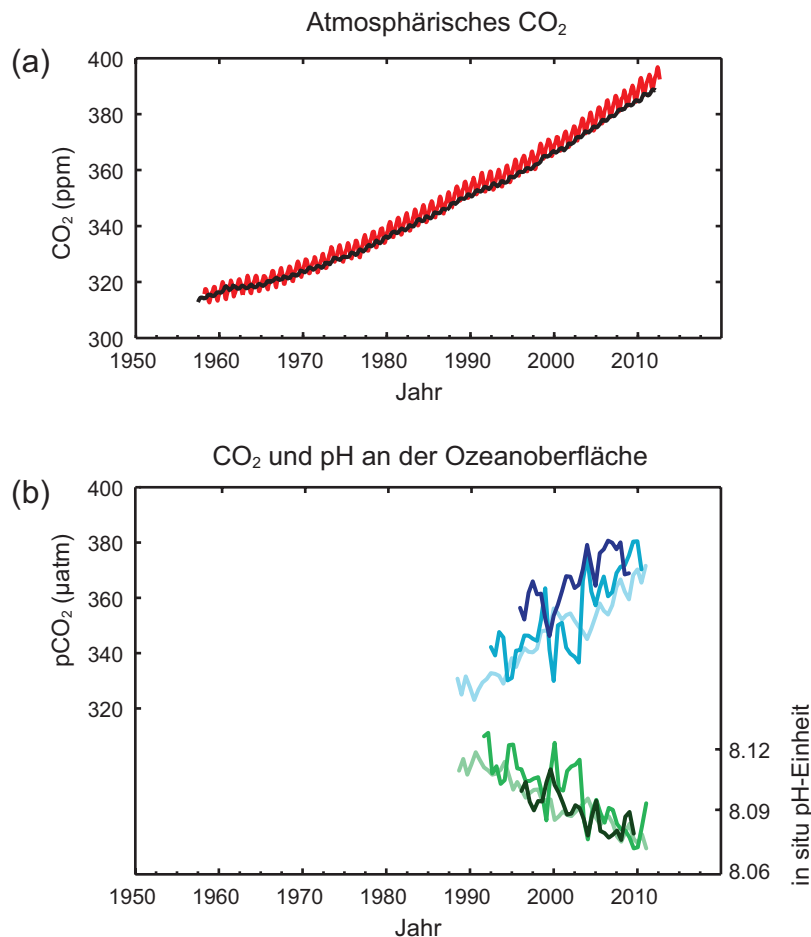
## B.5 Kohlenstoff und andere Biogeochemische Kreisläufe

**Die atmosphärischen Konzentrationen von Kohlendioxid, Methan und Lachgas sind auf Werte angestiegen, die seit mindestens den letzten 800 000 Jahren noch nie vorgekommen sind. Die Kohlendioxid-Konzentrationen sind seit der vorindustriellen Zeit um 40% angestiegen, primär durch die Emissionen aus fossilen Brennstoffen und sekundär durch Netto-Emissionen aufgrund von Landnutzungsänderungen. Der Ozean hat ungefähr 30% des emittierten anthropogenen Kohlendioxids aufgenommen und dadurch eine Versauerung erfahren (siehe Abbildung SPM.4). {2.2, 3.8, 5.2, 6.2, 6.3}**

- Die atmosphärischen Konzentrationen der Treibhausgase Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>), Methan (CH<sub>4</sub>) und Lachgas (N<sub>2</sub>O) sind seit 1750 alle aufgrund menschlicher Aktivitäten angestiegen. Im Jahr 2011 betrugen die Konzentrationen dieser Treibhausgase 391 ppm<sup>11</sup>, 1803 ppb, bzw. 324 ppb und übertrafen die vorindustriellen Werte um ca. 40%, 150% bzw. 20%. {2.2, 5.2, 6.1, 6.2}

<sup>11</sup> ppm (parts per million) oder ppb (parts per billion, 1 billion = 1000 million) ist der Anteil der Zahl von Gasmolekülen in Bezug auf die Gesamtzahl der Moleküle in trockener Luft. Zum Beispiel bedeuten 300 ppm 300 Moleküle eines bestimmten Gases pro Million Moleküle trockene Luft.

- Die Konzentrationen von  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  und  $\text{N}_2\text{O}$  übertreffen nun die höchsten in Eisbohrkernen über die letzten 800 000 Jahre enthaltenen Konzentrationen erheblich. Die mittleren Geschwindigkeiten des Anstiegs der atmosphärischen Konzentrationen über das letzte Jahrhundert sind mit *sehr hohem Vertrauen* in den letzten 22 000 Jahren noch nie vorgekommen. {5.2, 6.1, 6.2}
- Die jährlichen  $\text{CO}_2$ -Emissionen aus der Verbrennung fossiler Brennstoffe und der Zementproduktion betrugen von 2002–2011 durchschnittlich 8.3 [7.6 bis 9.0] GtC pro Jahr<sup>12</sup> (*hohes Vertrauen*) und im Jahr 2011 9.5 [8.7 bis 10.3] GtC pro Jahr, 54% über dem Niveau von 1990. Die jährliche Netto- $\text{CO}_2$ -Emission der anthropogenen Landnutzungsänderungen lagen von 2002 bis 2011 durchschnittlich bei 0.9 [0.1 bis 1.7] GtC pro Jahr (*mittleres Vertrauen*). {6.3}
- Von 1750 bis 2011 wurden durch die  $\text{CO}_2$ -Emissionen aus der Verbrennung fossiler Brennstoffe und der Zementproduktion 375 [345 bis 405] GtC in die Atmosphäre freigesetzt, während Abholzung und andere Landnutzungsänderungen schätzungsweise 180 [100 bis 260] GtC freigesetzt haben. Dies ergibt einen Gesamtbetrag der anthropogenen Emissionen von 555 [470 bis 640] GtC. {6.3}
- Von diesem Gesamtbetrag der anthropogenen  $\text{CO}_2$ -Emissionen haben sich in der Atmosphäre 240 [230 bis 250] GtC angesammelt, 155 [125 bis 185] GtC wurden vom Ozean aufgenommen und 160 [70 bis 250] GtC wurden in natürlichen Landökosystemen gespeichert (d.h. kumulative restliche Landsenke). {Abbildung TS.4, 3.8, 6.3}
- Die Ozean-Versauerung wird durch Abnahmen des pH-Wertes<sup>13</sup> quantifiziert. Der pH-Wert des Meeresoberflächenwassers hat seit Beginn des Industriezeitalters um 0.1 abgenommen (*hohes Vertrauen*), was einem Anstieg der Wasserstoffionen-Konzentration um 26% entspricht (siehe Abbildung SPM.4). {3.8, Box 3.2}



**Abbildung SPM.4** | Mehrfache beobachtete Indikatoren eines sich verändernden globalen Kohlenstoff-Kreislaufs: (a) Atmosphärische Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ )-Konzentrationen vom Mauna Loa ( $19^\circ 32' \text{N}$ ,  $155^\circ 34' \text{W}$  – rot) und vom Südpol ( $89^\circ 59' \text{S}$ ,  $24^\circ 48' \text{W}$  – schwarz) seit 1958. (b) Teildruck von gelöstem  $\text{CO}_2$  an der Ozeanoberfläche (blaue Kurven) und in situ pH (grüne Kurven), ein Maß für den Säuregehalt des Ozeanwassers. Die Messungen stammen von drei Stationen aus dem Atlantik ( $29^\circ 10' \text{N}$ ,  $15^\circ 30' \text{W}$  – dunkelblau/dunkelgrün;  $31^\circ 40' \text{N}$ ,  $64^\circ 10' \text{W}$  – blau/grün) und dem Pazifischen Ozean ( $22^\circ 45' \text{N}$ ,  $158^\circ 00' \text{W}$  – hellblau/hellgrün). Vollständige Einzelheiten der hier dargestellten Datensätze sind im zugrundeliegenden Bericht und im Zusatzmaterial zur Technischen Zusammenfassung zu finden. (Abbildungen 2.1 und 3.18; Abbildung TS.5)

## C. Treiber der Klimaänderung

Natürliche und anthropogene Stoffe und Prozesse, welche die Energiebilanz der Erde verändern, sind Treiber des Klimawandels. Der Strahlungsantrieb<sup>14</sup> („radiative forcing“, RF) quantifiziert die durch Veränderungen der Treiber verursachte Änderung des Energieflusses im Jahr 2011 bezogen auf 1750, sofern nicht anderweitig vermerkt. Positive RF-Werte führen zu einer Erwärmung der Erdoberfläche, negative RF-Werte zu einer Abkühlung der Erdoberfläche. Der RF wird abgeschätzt basierend auf in-situ- und Fernerkundungs-Beobachtungen, den Eigenschaften von Treibhausgasen und Aerosolen sowie Berechnungen mit numerischen Modellen, welche die beobachteten Prozesse darstellen. Einige emittierte Stoffe beeinflussen die atmosphärische Konzentration von anderen Substanzen. Der RF kann basierend auf atmosphärischen Konzentrationsänderungen jeder Substanz beschrieben werden.<sup>15</sup> Alternativ kann der emissionsbasierte RF eines Stoffes aufgeführt werden, was einen direkteren Bezug zu menschlichen Aktivitäten liefert. Er beinhaltet Beiträge von allen Substanzen, die durch diese Emission beeinflusst werden. Der gesamte anthropogene RF der beiden Ansätze ist identisch, wenn alle Treiber berücksichtigt werden. Obwohl in dieser Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger beide Ansätze verwendet werden, werden die emissionsbasierten RFs hervorgehoben.

**Der gesamte anthropogene Strahlungsantrieb ist positiv und hat zu einer Aufnahme von Energie durch das Klimasystem geführt. Der größte Beitrag zum gesamten Strahlungsantrieb wurde durch den Anstieg der atmosphärischen CO<sub>2</sub>-Konzentration seit 1750 verursacht (siehe Abbildung SPM.5). {3.2, Box 3.1, 8.3, 8.5}**

- Der gesamte anthropogene RF für 2011 bezogen auf 1750 beträgt 2.29 [1.13 bis 3.33] W m<sup>-2</sup> (siehe Abbildung SPM.5) und ist seit 1970 schneller gewachsen als in den vorhergehenden Jahrzehnten. Der beste Schätzwert des gesamten anthropogenen RF für 2011 ist um 43% höher als der für das Jahr 2005 im AR4 berichtete. Dies liegt an einer Kombination des fortwährenden Anstiegs der meisten Treibhausgaskonzentrationen und verbesserten Schätzungen für den RF durch Aerosole, die auf einen schwächeren Netto-Kühlungseffekt (negativer RF) hinweisen. {8.5}
- Der RF von Emissionen von gut gemischten Treibhausgasen (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O und Halogenkohlenwasserstoffen) für 2011 bezogen auf 1750 beträgt 3.00 [2.22 bis 3.78] W m<sup>-2</sup> (siehe Abbildung SPM.5). Der RF von Veränderungen in den Konzentrationen dieser Gase ist 2.83 [2.26 bis 3.40] W m<sup>-2</sup>. {8.5}
- Emissionen von CO<sub>2</sub> allein haben einen RF von 1.68 [1.33 bis 2.03] W m<sup>-2</sup> verursacht (siehe Abbildung SPM.5). Unter Einbeziehung von Emissionen anderer kohlenstoffhaltiger Gase, die ebenfalls zum Anstieg der CO<sub>2</sub>-Konzentration beigetragen haben, ergibt der RF von CO<sub>2</sub> 1.82 [1.46 bis 2.18] W m<sup>-2</sup>. {8.3, 8.5}
- Emissionen von CH<sub>4</sub> allein haben einen RF von 0.97 [0.74 bis 1.20] W m<sup>-2</sup> verursacht (siehe Abbildung SPM.5). Dies ist viel mehr als der auf Konzentrationen beruhende Schätzwert von 0.48 [0.38 bis 0.58] W m<sup>-2</sup> (unverändert seit AR4). Dieser Unterschied in den Schätzungen ist verursacht durch Konzentrationsänderungen von Ozon und stratosphärischem Wasserdampf aufgrund von CH<sub>4</sub>-Emissionen und anderen Emissionen, die CH<sub>4</sub> indirekt beeinflussen. {8.3, 8.5}
- Emissionen von stratosphärischen Ozon-abbauenden Halogenkohlenwasserstoffen haben einen positiven Netto-RF von 0.18 [0.01 bis 0.35] W m<sup>-2</sup> verursacht (siehe Abbildung SPM.5). Deren eigener positiver RF hat den negativen RF durch den Ozonabbau, den sie ausgelöst haben, überwogen. Der positive RF von allen Halogenkohlenwasserstoffen ist ähnlich zum Wert im AR4, mit einem reduzierten RF von CFCs, jedoch einem Anstieg von vielen ihrer Ersatzstoffe. {8.3, 8.5}
- Emissionen von kurzlebigen Gasen tragen zum gesamten anthropogenen Strahlungsantrieb bei. Emissionen von Kohlenmonoxid (CO) haben *praktisch sicher* einen positiven RF bewirkt, während Emissionen von Stickstoffoxiden (NO<sub>x</sub>) *wahrscheinlich* einen negativen RF verursacht haben (siehe Abbildung SPM.5). {8.3, 8.5}

<sup>12</sup> 1 Gigatonne Kohlenstoff = 1GtC = 10<sup>15</sup> Gramm Kohlenstoff. Dies entspricht 3.667 GtCO<sub>2</sub>.

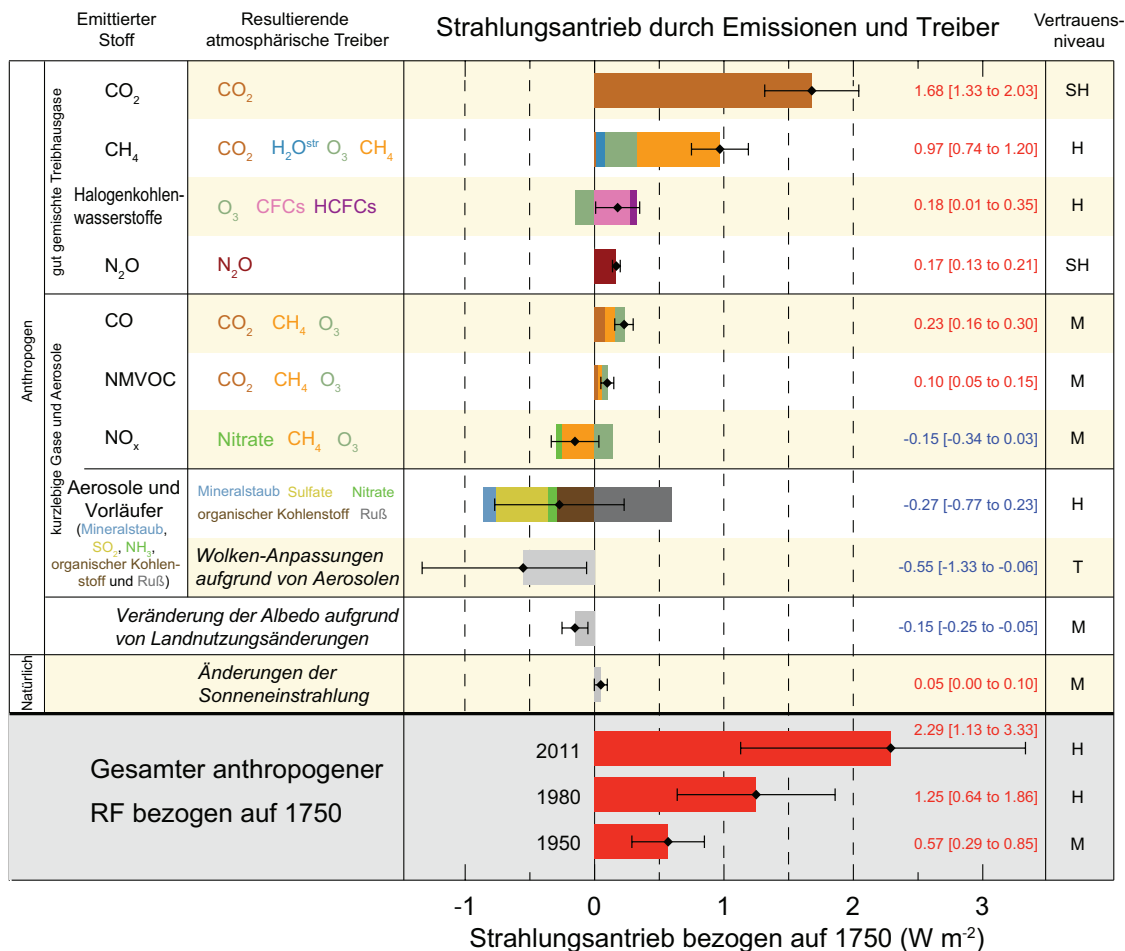
<sup>13</sup> pH ist eine Maßeinheit von Säure mit einer logarithmischen Skala: Eine Abnahme des pH-Wertes um eine Einheit entspricht einem 10-fachen Anstieg der Wasserstoffionen-Konzentration bzw. des Säuregehalts.

<sup>14</sup> Die Stärke von Treibern wird wie in früheren IPCC Sachstandsberichten als Strahlungsantrieb („radiative forcing“, RF) in Einheiten von Watt pro Quadratmeter (W m<sup>-2</sup>) quantifiziert. RF bezeichnet die durch einen Treiber verursachte Abweichung im Energiefluss und wird an der Tropopause oder an der Obergrenze der Atmosphäre berechnet. Im in früheren IPCC-Berichten verwendeten traditionellen RF-Konzept werden alle Bedingungen an der Erdoberfläche und in der Troposphäre konstant gehalten. In den RF-Berechnungen für gut gemischte Treibhausgase und Aerosole in diesem Bericht können die physikalischen Größen, mit Ausnahme für den Ozean und Meereis, mit raschen Anpassungen auf Störungen reagieren. Der daraus resultierende Antrieb wird im zugrundeliegenden Bericht Effektiver Strahlungsantrieb (Effective Radiative Forcing: ERF) genannt. Diese Änderung spiegelt den wissenschaftlichen Fortschritt früherer Beurteilungen wider und ergibt einen besseren Anhaltspunkt für die letztendliche Reaktion der Temperatur auf diese Treiber. Für alle anderen Treiber, ausgenommen gut gemischte Treibhausgase und Aerosole, sind rasche Anpassungen weniger gut charakterisiert und werden als gering angenommen. Daher wird der traditionelle RF verwendet. {8.1}

<sup>15</sup> Dieser Ansatz wurde für die Beschreibung des RF in der AR4 Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger (SPM) verwendet.



- Der RF des gesamten Aerosoleffekts in der Atmosphäre, welcher Wolken-Anpassungen aufgrund von Aerosolen einschließt, ist  $-0.9$  [ $-1.9$  bis  $-0.1$ ]  $\text{W m}^{-2}$  (*mittleres Vertrauen*) und stammt von einem negativen Antrieb der meisten Aerosole und einem positiven Beitrag der Absorption von Sonneneinstrahlung durch Ruß. Das *Vertrauen* ist *hoch*, dass Aerosole und deren Wechselwirkungen mit Wolken einen wesentlichen Anteil des globalen mittleren Antriebs durch gut gemischte Treibhausgase kompensiert haben. Sie tragen weiterhin die größte Unsicherheit zum gesamten RF-Schätzwert bei. {7.5, 8.3, 8.5}
- Der Antrieb durch stratosphärische vulkanische Aerosole kann nach Vulkanausbrüchen über einige Jahre große Auswirkungen auf das Klima haben. Mehrere kleine Ausbrüche haben in den Jahren 2008 bis 2011 einen RF von  $-0.11$  [ $-0.15$  bis  $-0.08$ ]  $\text{W m}^{-2}$  verursacht, was ungefähr doppelt so viel ist wie während der Jahre 1999 bis 2002. {8.4}
- Der RF bedingt durch Änderungen der Sonneneinstrahlung wird auf  $0.05$  [ $0.00$  bis  $0.10$ ]  $\text{W m}^{-2}$  geschätzt (siehe Abbildung SPM.5). Satellitenbeobachtungen der gesamten Veränderungen der Sonneneinstrahlung von 1978 bis 2011 deuten darauf hin, dass das jüngste solare Minimum niedriger war als die zwei vorherigen. Dies bewirkt einen RF von  $-0.04$  [ $-0.08$  bis  $0.00$ ]  $\text{W m}^{-2}$  zwischen dem jüngsten Minimum von 2008 und dem Minimum von 1986. {8.4}
- Der gesamte natürliche RF von Veränderungen der Sonneneinstrahlung und stratosphärischen vulkanischen Aerosolen trugen nur wenig zum Netto-Strahlungsantrieb im letzten Jahrhundert bei, mit Ausnahme von kurzen Perioden nach großen Vulkanausbrüchen. {8.5}



**Abbildung SPM.5 |** Schätzwerte des Strahlungsantriebs im Jahr 2011 bezogen auf 1750 sowie kumulative Unsicherheiten für die Haupttreiber des Klimawandels. Die Werte stellen globale Mittel des Strahlungsantriebs ( $\text{RF}^{14}$ ) dar, aufgeteilt gemäß den emittierten Stoffen oder Prozessen, die zu einer Kombination von Treibern führen. Die besten Schätzungen des Netto-Strahlungsantriebs sind als schwarze Rhomben mit den entsprechenden Unsicherheitsbereichen dargestellt; die numerischen Werte sind auf der rechten Seite der Abbildung aufgeführt, zusammen mit dem Vertrauensniveau des Nettoantriebs (SH – *sehr hoch*, H – *hoch*, M – *mittel*, T – *gering*, ST – *sehr gering*). Der Albedo-Antrieb durch Ruß auf Schnee und Eis ist im Ruß-Aerosol-Balken enthalten. Kleine Antriebe durch Kondensstreifen ( $0.05 \text{ W m}^{-2}$ , einschließlich durch Kondensstreifen gebildete Cirruswolken) und HFCs, PFCs und SF6 (gesamt  $0.03 \text{ W m}^{-2}$ ) sind nicht dargestellt. Konzentrationsbasierte RFs für Gase können durch das Summieren der gleich gefärbten Balken erhalten werden. Der vulkanische Antrieb ist nicht aufgeführt, da dessen episodischer Charakter einen Vergleich mit anderen Antriebsmechanismen schwierig macht. Der gesamte anthropogene Strahlungsantrieb ist für drei verschiedene Jahre bezogen auf 1750 dargestellt. Für weitere technische Details, einschließlich der Unsicherheitsbereiche für individuelle Komponenten und Prozesse, siehe Zusatzmaterial der Technischen Zusammenfassung. {8.5; Abbildungen 8.14–8.18; Abbildungen TS.6 und TS.7}

## D. Verständnis des Klimasystems und dessen jüngster Veränderungen

Das Verständnis der jüngsten Veränderungen im Klimasystem stammt aus einer Kombination von Beobachtungen, Studien von Rückkopplungs-Prozessen und Modellsimulationen. Die Bewertung der Fähigkeit von Klimamodellen, die jüngsten Veränderungen zu simulieren, erfordert die Berücksichtigung des Zustandes aller modellierten Komponenten des Klimasystems zu Beginn der Simulation und des für den Modellantrieb verwendeten natürlichen und anthropogenen Antriebs. Im Vergleich zum AR4 erlauben nun detaillierte und längere Beobachtungen sowie verbesserte Klimamodelle die Zuordnung eines menschlichen Beitrags zu festgestellten Veränderungen für mehr Komponenten des Klimasystems.

**Der menschliche Einfluss auf das Klimasystem ist klar. Das ist offensichtlich aufgrund der ansteigenden Treibhausgaskonzentrationen in der Atmosphäre, dem positiven Strahlungsantrieb, der beobachteten Erwärmung und des Verständnisses des Klimasystems. {2–14}**

### D.1 Bewertung von Klimamodellen

**Die Klimamodelle sind seit dem AR4 besser geworden. Die Modelle geben die beobachteten Muster und Trends über viele Dekaden der Erdoberflächentemperatur im kontinentalen Maßstab wieder, einschließlich der stärkeren Erwärmung seit Mitte des 20. Jahrhunderts und der unmittelbar auf große Vulkaneruptionen folgenden Abkühlung (sehr hohes Vertrauen). {9.4, 9.6, 9.8}**

- Die Langzeit-Klimamodellsimulationen zeigen einen Trend der mittleren globalen Erdoberflächentemperatur von 1951 bis 2012, der mit dem beobachteten Trend übereinstimmt (*sehr hohes Vertrauen*). Es gibt jedoch Unterschiede zwischen den simulierten und beobachteten Trends über kurze Zeiträume von 10 bis 15 Jahren (z.B. 1998 bis 2012). {9.4, Box 9.2}
- Die beobachtete Reduktion des Erwärmungstrends an der Erdoberfläche im Zeitraum von 1998 bis 2012 im Vergleich zum Zeitraum von 1951 bis 2012 wird in ungefähr gleichem Maß durch einen reduzierten Trend im Strahlungsantrieb und einen kühlenden Beitrag der natürlichen internen Schwankungen verursacht, die eine mögliche Umverteilung von Wärme im Ozean einschließt (*mittleres Vertrauen*). Der reduzierte Trend im Strahlungsantrieb stammt vor allem von Vulkanausbrüchen und dem zeitlichen Ablauf der rückläufigen Phase des 11-Jahres-Sonnenzyklus. Das *Vertrauen* in die Quantifizierung der Rolle von Änderungen im Strahlungsantrieb bei der Reduktion des Erwärmungstrends ist jedoch *gering*. Das *Vertrauen* ist *mittel*, dass hauptsächlich natürliche interne dekadische Schwankungen den Unterschied zwischen Beobachtungen und Simulationen verursachen; von letzteren wird nicht erwartet, dass sie den zeitlichen Ablauf der natürlichen internen Schwankungen wiedergeben. Es sind auch Beiträge durch Unzulänglichkeiten im Antrieb und, in einigen Modellen, durch eine Überschätzung der Reaktion auf den zunehmenden Treibhausgas- und andere anthropogene Antriebe möglich (hauptsächlich Aerosol-Effekte). {9.4, Box 9.2, 10.3, Box 10.2, 11.3}
- Im regionalen Maßstab ist das Vertrauen in die Modelltauglichkeit, die Erdoberflächentemperatur zu simulieren, geringer als im größeren Maßstab. Trotzdem ist das *Vertrauen hoch*, dass die Erdoberflächentemperaturen auf regionaler Ebene besser simuliert werden als zur Zeit des AR4. {9.4, 9.6}
- Es gab seit dem AR4 wesentliche Fortschritte in der Beurteilung von extremen Wetter- und Klimaereignissen. Die simulierten mittleren globalen Trends der Häufigkeit von extremen warmen und kalten Tagen und Nächten in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts sind im Allgemeinen mit den Beobachtungen konsistent. {9.5}
- Es gibt seit dem AR4 einige Verbesserungen in der Simulation von Niederschlagsmustern im kontinentalen Maßstab. Auf regionaler Ebene werden Niederschläge nicht so gut simuliert, und die Beurteilung wird durch Unsicherheiten in den Beobachtungen erschwert. {9.4, 9.6}
- Einige wichtige Klimaphänomene werden von den Modellen nun besser wiedergegeben. Das *Vertrauen* ist *hoch*, dass sich die auf Multimodell-Simulationen basierenden Statistiken des Monsuns und der El Niño-Southern Oscillation (ENSO) seit dem AR4 verbessert haben. {9.5}

- Klimamodelle beinhalten nun mehr Wolken- und Aerosol-Prozesse sowie deren Wechselwirkungen, als zur Zeit von AR4, jedoch bleibt das *Vertrauen* in die Darstellung und die Quantifizierung dieser Prozesse in den Modellen *gering*. {7.3, 7.6, 9.4, 9.7}
- Es gibt starke Hinweise darauf, dass der fallende Trend der sommerlichen Ausdehnung des arktischen Meereises seit 1979 nun von mehr Modellen wiedergegeben wird als zur Zeit von AR4. Ungefähr ein Viertel der Modelle zeigt einen Trend, der so groß oder größer als der beobachtete Trend ist. Die meisten Modelle zeigen einen geringen rückläufigen Trend in der Ausdehnung des antarktischen Meereises, wenn auch mit großen Differenzen zwischen den Modellen, im Gegensatz zum geringen ansteigenden Trend in den Beobachtungen. {9.4}
- Viele Modelle geben die beobachteten Veränderungen im Wärmegehalt des oberen Ozeans (0–700 m) von 1961 bis 2005 wieder (*hohes Vertrauen*), wobei das Multimodell-Zeitreihen-Mittel für den Großteil dieses Zeitraums im Bereich der verfügbaren Schätzungen aus Beobachtungen liegt. {9.4}
- Klimamodelle, die den Kohlenstoffkreislauf einbeziehen (Erdsystemmodelle), simulieren die globalen Muster der CO<sub>2</sub>-Flüsse zwischen Ozean und Atmosphäre mit dem Ausgasen in den Tropen und der Aufnahme in den mittleren und hohen Breiten. In der Mehrheit dieser Modelle liegen die Werte der simulierten globalen Kohlenstoff-Senken an Land und im Ozean im letzten Teil des 20. Jahrhunderts im Bereich der Abschätzungen aus Beobachtungen. {9.4}

## D.2 Quantifizierung von Reaktionen des Klimasystems

**Beobachtungs- und Modellstudien der Temperaturveränderung, der klimatischen Rückkopplungen und der Veränderung der Energiebilanz der Erde zusammen geben Vertrauen in das Ausmaß der globalen Erwärmung als Folge des vergangenen und zukünftigen Antriebs.**

{Box 12.2, Box 13.1}

- Die Netto-Rückkopplung aus dem kombinierten Effekt von Veränderungen des Wasserdampfs und Unterschieden zwischen der Erwärmung der Atmosphäre und der Erdoberfläche ist *äußerst wahrscheinlich* positiv und verstärkt deshalb die Veränderungen des Klimas. Die Netto-Strahlungs-Rückkopplung ist aufgrund aller Wolkenarten *wahrscheinlich* positiv. Unsicherheit im Vorzeichen und in der Stärke der Wolken-Rückkopplung stammt vor allem von der anhaltenden Unsicherheit in den Auswirkungen der Erwärmung auf tiefliegende Wolken. {7.2}
- Die Gleichgewichts-Klimasensitivität quantifiziert die Reaktion des Klimasystems auf einen konstanten Strahlungsantrieb auf der Zeitskala von mehreren Jahrhunderten. Sie wird definiert als die Veränderung der globalen mittleren Erdoberflächentemperatur im Gleichgewicht, das durch eine Verdoppelung der atmosphärischen CO<sub>2</sub>-Konzentration bewirkt wird. Die Gleichgewichts-Klimasensitivität liegt *wahrscheinlich* im Bereich von 1.5 °C bis 4.5 °C (*hohes Vertrauen*), ist *äußerst unwahrscheinlich* kleiner als 1 °C (*hohes Vertrauen*) und *sehr unwahrscheinlich* größer als 6 °C (*mittleres Vertrauen*). Die untere Temperaturgrenze des geschätzten *wahrscheinlichen* Bereichs ist also kleiner als die 2 °C im AR4, jedoch ist die obere Grenze die gleiche. Diese Beurteilung spiegelt das verbesserte Verständnis, verlängerte Messreihen der Temperatur in der Atmosphäre und des Ozeans sowie neue Schätzungen des Strahlungsantriebs wider. {TS TFE6, Abbildung 1; Box 12.2}
- Die Geschwindigkeit und das Ausmaß des globalen Klimawandels werden durch den Strahlungsantrieb, Klima-Rückkopplungen und die Speicherung von Energie durch das Klimasystem bestimmt. Abschätzungen dieser Größen für die letzten Jahrzehnte stimmen mit dem geschätzten *wahrscheinlichen* Bereich der Gleichgewichts-Klimasensitivität im Rahmen der beurteilten Unsicherheiten überein. Dies ist ein starker Beleg für unser Verständnis des anthropogenen Klimawandels. {Box 12.2, Box 13.1}
- Die Übergangs-Klimareaktion (TCR) quantifiziert die Reaktion des Klimasystems auf einen zunehmenden Strahlungsantrieb auf der Zeitskala von Jahrzehnten bis Jahrhunderten. Sie wird definiert als die Veränderung der mittleren globalen Erdoberflächentemperatur zum Zeitpunkt, wenn sich die atmosphärische CO<sub>2</sub>-Konzentration in einem Szenario mit einem Konzentrationsanstieg von 1% pro Jahr verdoppelt hat. Die Übergangs-Klimareaktion liegt *wahrscheinlich* im Bereich von 1.0 °C bis 2.5 °C (*hohes Vertrauen*) und ist *äußerst unwahrscheinlich* größer als 3 °C. {Box 12.2}

<sup>16</sup> Aufgrund fehlender Übereinstimmung der Werte aus den beurteilten Anhaltspunkten und Studien kann kein bester Schätzwert für die Gleichgewichts-Klimasensitivität angegeben werden.

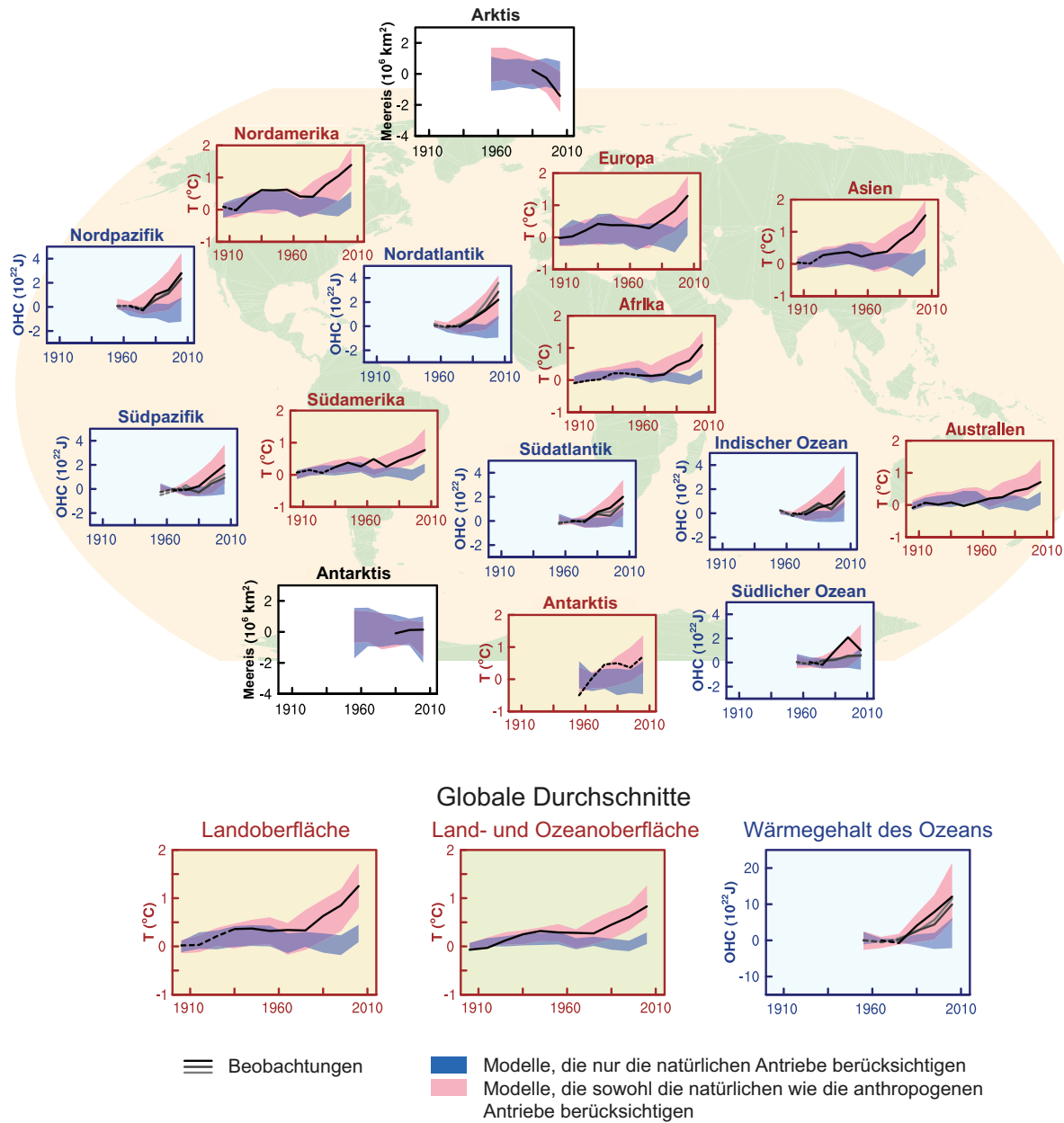
- Eine themenverwandte Größe ist die Übergangs-Klimareaktion auf kumulative Kohlenstoffemissionen (TCRE). Sie quantifiziert die Übergangsreaktion des Klimasystems auf kumulative Kohlenstoffemissionen (siehe Abschnitt E.8). TCRE ist definiert als die Veränderung der mittleren globalen Erdoberflächentemperatur pro 1000 GtC, die in die Atmosphäre emittiert werden. TCRE liegt *wahrscheinlich* im Bereich von 0.8 °C bis 2.5 °C pro 1000 GtC und lässt sich für kumulative Emissionen bis ca. 2000 GtC verwenden bis die Temperaturen ihren Höchststand erreichen (siehe Abbildung SPM.10). {12.5; Box 12.2}
- Verschiedene Maße können für den Vergleich der Beiträge der Emissionen verschiedener Substanzen zum Klimawandel verwendet werden. Welches die am besten geeignete Maßzahl bzw. der am besten geeignete Zeithorizont ist, hängt davon ab, welche Aspekte des Klimawandels als die wichtigsten für eine bestimmte Fragestellung angesehen werden. Keine einzelne Maßzahl kann alle Folgen von unterschiedlichen Emissionen genau vergleichen, und alle haben ihre Grenzen und Unsicherheiten. Das Treibhauspotenzial bezieht sich auf den kumulativen Strahlungsantrieb über einen bestimmten Zeithorizont und das Globale Temperaturänderungspotential basiert auf der Änderung der mittleren globalen Erdoberflächentemperatur zu einem ausgewählten Zeitpunkt. Aktuelle Werte sind im zugrundeliegenden Bericht bereitgestellt. {8.7}

### D.3 Erkennung und Zuordnung von Klimawandel

**Der menschliche Einfluss wurde in der Erwärmung der Atmosphäre und des Ozeans, in Veränderungen des globalen Wasserkreislaufs, in der Abnahme von Schnee und Eis, im Anstieg des mittleren globalen Meeresspiegels und in Veränderungen einiger Klimaextreme erkannt (siehe Abbildung SPM.6 und Tabelle SPM.1). Die Indizien für den menschlichen Einfluss haben seit dem AR4 zugenommen. Es ist *äußerst wahrscheinlich*, dass der menschliche Einfluss die Hauptursache der beobachteten Erwärmung seit Mitte des 20. Jahrhunderts war. {10.3–10.6, 10.9}**

- Es ist *äußerst wahrscheinlich*, dass mehr als die Hälfte des beobachteten Anstiegs der mittleren globalen Erdoberflächentemperatur von 1951 bis 2010 durch den anthropogenen Anstieg der Treibhausgaskonzentrationen zusammen mit anderen anthropogenen Antrieben verursacht wurde. Die beste Abschätzung des anthropogenen Beitrags zur Erwärmung ist ähnlich wie die beobachtete Erwärmung in diesem Zeitraum. {10.3}
- *Wahrscheinlich* trugen Treibhausgase im Bereich von 0.5 °C bis 1.3 °C zur Erwärmung der mittleren globalen Erdoberflächentemperatur über den Zeitraum von 1951 bis 2010 bei, mit Beiträgen von anderen anthropogenen Antrieben, einschließlich der kühlenden Wirkung der Aerosole, im Bereich von -0.6 °C bis 0.1 °C. Die Beiträge der natürlichen Antriebe liegen *wahrscheinlich* im Bereich von -0.1 °C bis 0.1 °C, von internen Schwankungen *wahrscheinlich* im Bereich von -0.1 °C bis 0.1 °C. Zusammengenommen sind diese abgeschätzten Beiträge mit der beobachteten Erwärmung von ungefähr 0.6 °C bis 0.7 °C in diesem Zeitraum konsistent. {10.3}
- Über jeder kontinentalen Region mit Ausnahme der Antarktis haben anthropogene Antriebe *wahrscheinlich* wesentlich zum Anstieg der Oberflächentemperatur seit Mitte des 20. Jahrhunderts beigetragen (siehe Abbildung SPM.6). Große beobachtete Unsicherheiten für die Antarktis führen zu einem *geringen Vertrauen*, dass anthropogene Antriebe zur beobachteten, über die verfügbaren Stationen gemittelte Erwärmung beigetragen haben. Es ist *wahrscheinlich*, dass es einen anthropogenen Beitrag zur sehr erheblichen Erwärmung der Arktis seit Mitte des 20. Jahrhunderts gab. {2.4, 10.3}
- Es ist *sehr wahrscheinlich*, dass der anthropogene Einfluss, vor allem Treibhausgase und stratosphärischer Ozonabbau, zu einem erkennbaren beobachteten Muster in der Erwärmung der Troposphäre und einer dementsprechenden Abkühlung in der unteren Stratosphäre seit 1961 geführt haben. {2.4, 9.4, 10.3}
- Es ist *sehr wahrscheinlich*, dass anthropogene Antriebe wesentlich zum seit den 1970er Jahren beobachteten Anstieg des Wärmeinhalts des oberen Ozeans (oberhalb von 700 m Tiefe) beigetragen haben (siehe Abbildung SPM.6). Es gibt Hinweise auf einen menschlichen Einfluss in einigen einzelnen Ozeanbecken. {3.2, 10.4}
- Es ist *wahrscheinlich*, dass anthropogene Einflüsse den globalen Wasserkreislauf seit 1960 beeinflusst haben. Anthropogene Einflüsse haben zu den beobachteten Erhöhungen des Feuchtigkeitsgehalts in der Atmosphäre (*mittleres Vertrauen*), zu den im globalen Maßstab feststellbaren Veränderungen der Niederschlagsmuster über Land (*mittleres Vertrauen*), zur





**Abbildung SPM.6** | Vergleich des beobachteten und simulierten Klimawandels basierend auf drei großräumigen Indikatoren in der Atmosphäre, der Kryosphäre und dem Ozean: Änderungen der kontinentalen Landoberflächentemperaturen (gelbe Felder), Ausdehnung des arktischen und antarktischen Meereises im September (weiße Felder) und Wärmegehalt der oberen Ozeansicht in den großen Ozeanbecken (blaue Felder). Die mittleren globalen Änderungen sind ebenfalls dargestellt. Die dargestellten Abweichungen beziehen sich auf 1880–1919 für Erdoberflächentemperaturen, 1960–1980 für den Wärmegehalt des Ozeans und 1979–1999 für das Meereis. Alle Zeitreihen sind 10-Jahres-Mittel, welche in der Mitte des Jahrzehnts markiert sind. In den Temperaturfeldern sind die Linien für die Beobachtungen gestrichelt, wenn die räumliche Abdeckung der untersuchten Flächen unterhalb von 50% liegt. Für die Felder des Wärmegehalts im Ozean und des Meereises sind die Linien durchgehend, wo die Abdeckung durch Daten gut und von besserer Qualität ist, und gestrichelt, wo die Abdeckung durch Daten nur angemessen und deshalb die Unsicherheit größer ist. Die dargestellten Modellresultate sind Multi-Modell-Ensemblebereiche aus dem Gekoppelten Modellvergleichsprojekt Phase 5 (CMIP5), wobei schattierte Streifen das 5 bis 95%-Vertrauensintervall anzeigen. Für weitere technische Details, einschließlich der Definitionen von Regionen, siehe Zusatzmaterial zur Technischen Zusammenfassung. (Abbildung 10.21; Abbildung TS.12)

Intensivierung von Starkniederschlägen über Landregionen, sofern ausreichend Daten vorliegen (*mittleres Vertrauen*), und zu Veränderungen des Salzgehaltes der Ozeane an und unterhalb der Meeresoberfläche beigetragen (*sehr wahrscheinlich*). {2.5, 2.6, 3.3, 7.6, 10.3, 10.4}

- Die Belege für einen menschlichen Einfluss auf Temperaturextreme haben sich seit dem SREX verstärkt. Es ist nun *sehr wahrscheinlich*, dass der menschliche Einfluss zu den beobachteten Veränderungen im globalen Maßstab in der Häufigkeit und Intensität von täglichen Temperaturextremen seit Mitte des 20. Jahrhunderts beigetragen hat und es ist *wahrscheinlich*, dass der menschliche Einfluss die Eintrittswahrscheinlichkeit von Hitzewellen in einigen Orten mehr als verdoppelt hat (siehe Tabelle SPM.1). {10.6}
- Anthropogene Einflüsse haben *sehr wahrscheinlich* zum Rückgang des arktischen Meereises seit 1979 beigetragen. Das *Vertrauen* in das wissenschaftliche Verständnis des kleinen Anstiegs in der Ausdehnung des antarktischen Meereises ist aufgrund von unvollständigen und widersprüchlichen wissenschaftlichen Erklärungen für die Ursachen der Veränderung *gering* und es gibt *geringes Vertrauen* in die Abschätzung der natürlichen internen Schwankungen in dieser Region (siehe Abbildung SPM.6). {10.5}
- Anthropogene Einflüsse haben *wahrscheinlich* zum Rückzug der Gletscher seit den 1960er Jahren und zum zunehmenden Massenverlust der Oberfläche des Grönländischen Eisschildes seit 1993 beigetragen. Aufgrund des geringen Niveaus des wissenschaftlichen Verständnisses ist das *Vertrauen* in die Zuordnung von Ursachen des beobachteten Massenverlustes des Antarktischen Eisschildes über die letzten zwei Jahrzehnte *gering*. {4.3, 10.5}
- Ein anthropogener Beitrag zum beobachteten Rückgang der Schneebedeckung im Frühjahr auf der Nordhemisphäre seit 1970 ist *wahrscheinlich*. {10.5}
- *Sehr wahrscheinlich* gibt es einen wesentlichen anthropogenen Beitrag zum Anstieg des mittleren globalen Meeresspiegels seit den 1970er Jahren. Dies basiert auf dem *hohen Vertrauen* in den anthropogenen Einfluss auf die zwei größten Beiträge zum Meeresspiegelanstieg, d.h. die thermische Ausdehnung und den Massenverlust der Gletscher. {10.4, 10.5, 13.3}
- Das *Vertrauen* ist *hoch*, dass die Veränderungen der totalen Sonneneinstrahlung nicht zum Anstieg der mittleren globalen Erdoberflächentemperatur im Zeitraum von 1986 bis 2008 beigetragen haben, basierend auf direkten Satellitenmessungen der totalen Sonneneinstrahlung. Das *Vertrauen* ist *mittel*, dass der 11-Jahres-Zyklus die solaren Schwankungen die Klimaschwankungen im Jahrzehntbereich in einigen Regionen beeinflusst. Es wurde keine robuste Verbindung zwischen Veränderungen der kosmischen Strahlung und der Bewölkung gefunden. {7.4, 10.3; Box 10.2}

## E. Zukünftiger globaler und regionaler Klimawandel

Projektionen von Änderungen im Klimasystem werden mit Hilfe einer Hierarchie von Klimamodellen gemacht, welche von einfachen Klimamodellen über Modelle mittlerer Komplexität bis zu umfassenden Klimamodellen und Erdsystemmodellen reichen. Diese Modelle simulieren die Veränderungen basierend auf einer Reihe von Szenarien mit anthropogenen Antrieben. Für die im Rahmen des Gekoppelten Modellvergleichsprojekts Phase 5 (CMIP5) des Weltklimaforschungsprogramms durchgeführten neuen Klimamodell-Simulationen wurde eine neue Reihe von Szenarien, die Repräsentativen Konzentrations-Pfade (RCPs), verwendet. In allen RCPs sind die atmosphärischen CO<sub>2</sub>-Konzentrationen in 2100 im Vergleich zu heute aufgrund des weiteren Anstiegs der kumulativen CO<sub>2</sub>-Emissionen in die Atmosphäre während des 21. Jahrhunderts (siehe Box SPM.1) höher. Die Projektionen in dieser Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger für das Ende des 21. Jahrhunderts (2081–2100) werden, wenn nicht anders vermerkt, auf den Zeitraum von 1986–2005 bezogen. Um solche Projektionen in einen historischen Kontext zu stellen, müssen die beobachteten Veränderungen zwischen verschiedenen Zeiträumen betrachtet werden. Basierend auf dem längsten verfügbaren Datensatz zur globalen Erdoberflächentemperatur ist die beobachtete Veränderung zwischen dem Mittel des Zeitraums von 1850–1900 und des Referenzzeitraums im AR5 0.61 [0.55 bis 0.67] °C. Allerdings hat schon eine Erwärmung über das Mittel des AR5-Referenzzeitraums hinaus stattgefunden. Deshalb ist dies keine Abschätzung der historischen Erwärmung bis heute (siehe Kapitel 2).

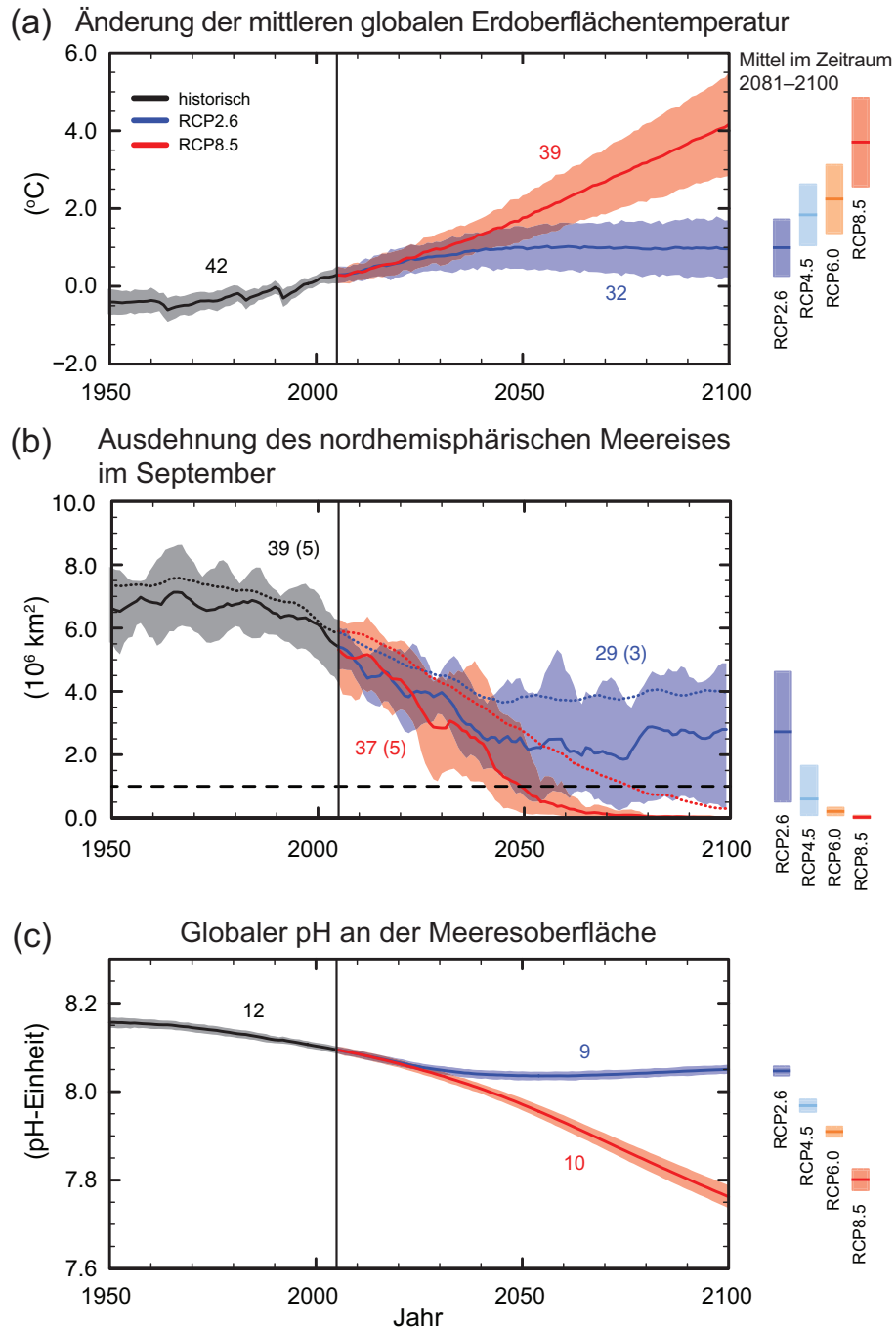
**Fortgesetzte Emissionen von Treibhausgasen werden eine weitere Erwärmung und Veränderungen in allen Komponenten des Klimasystems bewirken. Die Begrenzung des Klimawandels erfordert beträchtliche und anhaltende Reduktionen der Treibhausgas-Emissionen. {6, 11–14}**

- Die Projektionen für die nächsten Jahrzehnte zeigen einen Klimawandel mit ähnlichen räumlichen Mustern wie die für das späte 21. Jahrhundert projizierten Änderungen, aber von kleinerem Ausmaß. Natürliche interne Schwankungen werden weiterhin einen wesentlichen Einfluss auf das Klima haben, vor allem kurzfristig und im regionalen Maßstab. Bis Mitte des 21. Jahrhunderts wird das Ausmaß der projizierten Änderungen wesentlich durch die Wahl des Emissions-Szenarios beeinflusst (Box SPM.1). {11.3, Box 11.1, Annex I}
- Der auf den RCPs basierende projizierte Klimawandel ist ähnlich wie im AR4, sowohl bezüglich Muster als auch Ausmaß, nachdem Unterschiede in den Szenarien berücksichtigt werden. Die gesamte Bandbreite der Projektionen für die hohen RCPs ist schmäler als für die im AR4 verwendeten vergleichbaren Szenarien, da im Gegensatz zu den im AR4 verwendeten SRES-Emissionsszenarien die im AR5 verwendeten RCPs als Konzentrationspfade definiert sind und deshalb die Unsicherheiten im Kohlenstoffkreislauf, welche die CO<sub>2</sub>-Konzentration in den konzentrationgetriebenen CMIP5-Simulationen beeinflussen, nicht betrachtet werden. Die Projektionen des Meeresspiegelanstiegs sind größer als im AR4, hauptsächlich aufgrund der verbesserten Modellierung der Landeis-Beiträge. {11.3, 12.3, 12.4, 13.4, 13.5}

## E.1 Atmosphäre: Temperatur

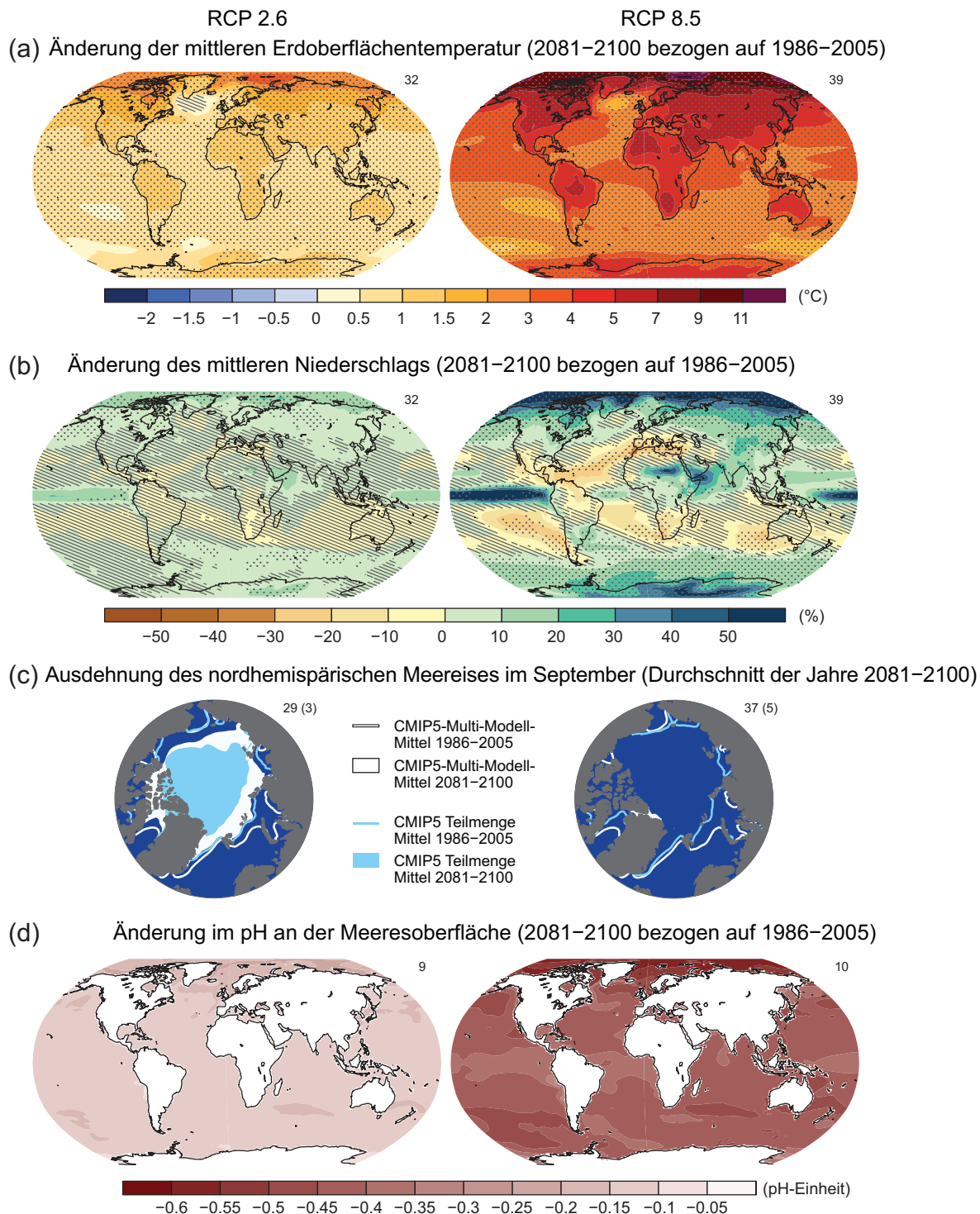
**Die Änderung der globalen Erdoberflächentemperatur wird am Ende des 21. Jahrhunderts, bezogen auf 1850–1900, für alle RCP-Szenarien außer RCP2.6 wahrscheinlich 1.5 °C übersteigen. Sie wird für RCP6.0 und RCP8.5 wahrscheinlich mehr als 2 °C sein und für RCP4.5 eher wahrscheinlich als nicht 2 °C übersteigen. Die Erwärmung wird unter allen RCP-Szenarien außer RCP2.6 über 2100 hinaus weitergehen. Die Erwärmung wird weiterhin Schwankungen auf Zeitskalen von Jahren bis Jahrzehnten aufweisen und regional nicht einheitlich sein (siehe Abbildungen SPM.7 und SPM.8). {11.3, 12.3, 12.4, 14.8}**

- Die Änderung der mittleren globalen Erdoberflächentemperatur für den Zeitraum von 2016–2035 bezogen auf 1986–2005 wird *wahrscheinlich* im Bereich von 0.3 °C bis 0.7 °C liegen (*mittleres Vertrauen*). Diese Beurteilung basiert auf mehreren Anhaltspunkten und geht davon aus, dass es keine größeren Vulkanausbrüche oder langfristige Änderungen der totalen Sonneneinstrahlung geben wird. Es wird erwartet, dass im Vergleich zu den natürlichen internen Schwankungen der kurzfristige Anstieg der saisonalen und jährlichen mittleren Temperaturen in den Tropen und Subtropen größer sein wird als in den mittleren Breitengraden (*hohes Vertrauen*). {11.3}
- Es wird projiziert, dass der Anstieg der mittleren globalen Erdoberflächentemperatur für 2081–2100 bezogen auf 1986–2005 *wahrscheinlich* in den aus den konzentrationgetriebenen CMIP5-Klimamodellen abgeleiteten Bereichen liegt, d.h. 0.3 °C bis 1.7 °C (RCP2.6), 1.1 °C bis 2.6 °C (RCP4.5), 1.4 °C bis 3.1 °C (RCP6.0), 2.6 °C bis 4.8 °C (RCP8.5). Das Gebiet der Arktis wird sich schneller erwärmen als das globale Mittel, und die mittlere Erwärmung über dem Land wird größer sein als über dem Meer (*sehr hohes Vertrauen*) (siehe Abbildungen SPM.7 und SPM.8, und Tabelle SPM.2). {12.4, 14.8}
- In Bezug auf den Durchschnitt der Jahre 1850 bis 1900 wird projiziert, dass die Änderung der globalen Erdoberflächentemperatur am Ende des 21. Jahrhunderts für RCP4.5, RCP6.0 und RCP8.5 *wahrscheinlich* 1.5 °C überschreiten wird (*hohes Vertrauen*). Die Erwärmung wird für RCP6.0 und RCP8.5 *wahrscheinlich* 2 °C überschreiten (*hohes Vertrauen*) und für RCP4.5 *eher wahrscheinlich als nicht* 2 °C überschreiten (*hohes Vertrauen*). Das Überschreiten von 2 °C für RCP2.6 ist jedoch *unwahrscheinlich* (*mittleres Vertrauen*). Das Überschreiten einer Erwärmung von 4 °C ist für RCP2.5, RCP4.5, und RCP6.0 *unwahrscheinlich* (*hohes Vertrauen*), und *ebenso wahrscheinlich wie nicht* für RCP8.5 (*mittleres Vertrauen*). {12.4}
- Es ist *praktisch sicher*, dass es über den meisten Landflächen auf der täglichen und jahreszeitlichen Zeitskala häufiger heiße und weniger kalte Temperaturextreme geben wird, wenn die mittlere globale Temperatur ansteigt. Es ist *sehr wahrscheinlich*, dass Hitzewellen mit größerer Häufigkeit und Dauer auftreten werden. Gelegentliche kalte Winterextreme werden weiterhin auftreten (siehe Tabelle SPM.1). {12.4}



**Abbildung SPM.7** | CMIP5 Multimodell-simulierte Zeitreihen von 1950 bis 2100 für (a) die Änderung der mittleren globalen Erdoberflächentemperatur bezogen auf 1986–2005, (b) Ausdehnung des nordhemisphärischen Meereises im September (gleitendes 5-Jahres-Mittel), und (c) mittlerer globaler pH an der Meeresoberfläche. Die Zeitreihen der Projektionen und ein Maß für die Unsicherheit (Schattierung) sind für die Szenarien RCP2.6 (blau) und RCP8.5 (rot) dargestellt. Schwarz (graue Schattierung) ist die modellierte historische Entwicklung hergeleitet aus historischen rekonstruierten Antrieben. Die über 2081–2100 gemittelten Mittel und dazugehörige Unsicherheiten sind für alle RCP-Szenarien als farbige vertikale Balken dargestellt. Die Zahlen der für die Berechnung des Multimodell-Mittels verwendeten CMIP5-Modelle sind angegeben. Für die Ausdehnung des Meereises (b) sind das projizierte Mittel sowie die Unsicherheit (Minimum-Maximum-Bereich) derjenigen Teilmenge von Modellen dargestellt, die den klimatologischen mittleren Zustand und den Trend von 1979 bis 2012 des arktischen Meereises am genauesten reproduzieren (die Zahl der Modelle ist in Klammern angeführt). Der Vollständigkeit wegen ist das CMIP5-Multimodell-Mittel mit gepunkteten Linien angezeigt. Die gestrichelte Linie stellt nahezu eisfreie Bedingungen dar (d.h. wenn die Ausdehnung des Meereises über mindestens fünf aufeinanderfolgende Jahre weniger als  $10^6 \text{ km}^2$  beträgt). Für weitere technische Details siehe Zusatzmaterial der Technischen Zusammenfassung. [Abbildungen 6.28, 12.5 und 12.28–12.31; Abbildungen TS.15, TS.17 und TS.20]





**Abbildung SPM.8** | Karten der CMIP5-Multimodell-Mittel-Ergebnisse für die Szenarien RCP2.6 und RCP8.5 für 2081–2100 von (a) der Änderung der jährlichen mittleren Erdoberflächentemperatur, (b) der durchschnittlichen prozentualen Änderungen des mittleren Niederschlags, (c) der Ausdehnung des nordhemisphärischen Meereises im September und (d) der Änderung im pH an der Meeresoberfläche. Die Änderungen in den Feldern (a), (b) und (d) beziehen sich auf 1986–2005. Die Zahl der für die Berechnungen des Multimodell-Mittel verwendeten CMIP5-Modelle ist in der rechten oberen Ecke in jedem Feld angegeben. In den Feldern (a) und (b) werden Regionen, in denen das Multimodell-Mittel im Vergleich zu den natürlichen internen Schwankungen klein ist, schraffiert dargestellt (d.h. kleiner als eine Standardabweichung der internen Schwankungen in den 20-Jahres-Mitteln). Punktiert sind Regionen, in denen das Multimodell-Mittel im Vergleich zu den internen Schwankungen groß ist (d.h. größer als zwei Standardabweichungen der internen Schwankungen in den 20-Jahres-Mitteln) und wo mindestens 90% der Modelle mit dem Vorzeichen der Änderung übereinstimmen (siehe Box 12.1). Im Feld (c) stellen die Linien die modellierten Mittel für 1986–2005 dar; die ausgefüllten Flächen sind für das Ende des Jahrhunderts. Das CMIP5-Multimodell-Mittel ist in weißer Farbe angegeben. Die projizierte, aus einer Teilmenge von Modellen gemittelte Ausdehnung des Meereises (Zahl der Modelle in Klammern), die den klimatologischen mittleren Zustand und den Trend von 1979 bis 2012 des arktischen Meereises am genauesten reproduzieren, ist in hellblauer Farbe dargestellt. Für weitere technische Details siehe Zusatzmaterial der Technischen Zusammenfassung. (Abbildungen 6.28, 12.11, 12.22 und 12.29; Abbildungen TS.15, TS.16, TS.17 und TS.20)

## E.2 Atmosphäre: Wasserkreislauf

**Änderungen im globalen Wasserkreislauf als Folge der Erwärmung im 21. Jahrhundert werden nicht einheitlich sein. Die Gegensätze in den Niederschlägen zwischen trockenen und feuchten Regionen und zwischen feuchten und trockenen Jahreszeiten werden zunehmen, auch wenn es regionale Ausnahmen geben kann (siehe Abbildung SPM.8). {12.4, 14.3}**

- Die für die nächsten Jahrzehnte projizierten Änderungen im Wasserkreislauf zeigen ähnliche großräumige Muster wie die gegen Ende des Jahrhunderts, jedoch mit kleinerem Ausmaß. Kurzfristige Änderungen und Änderungen im regionalen Maßstab werden stark von den natürlichen internen Schwankungen beeinflusst sein und könnten von anthropogenen Aerosolemissionen beeinflusst werden. {11.3}
- Die hohen Breitengraden und der äquatoriale pazifische Ozean werden bis Ende dieses Jahrhunderts unter dem RCP8.5-Szenario *wahrscheinlich* einen Anstieg der mittleren Jahresniederschläge erfahren. In vielen trockenen Regionen der mittleren Breiten und Subtropen werden die mittleren Niederschläge *wahrscheinlich* abnehmen, während in feuchten Regionen der mittleren Breiten die mittleren Niederschläge bis Ende dieses Jahrhunderts unter dem RCP8.5-Szenario *wahrscheinlich* zunehmen werden (siehe Abbildung SPM.8). {7.6, 12.4, 14.3}
- Extreme Niederschlagsereignisse werden über den meisten Landmassen der mittleren Breiten und über feuchten tropischen Regionen bis Ende dieses Jahrhunderts *sehr wahrscheinlich* intensiver und häufiger, wenn die mittlere globale Erdoberflächentemperatur ansteigt (siehe Tabelle SPM.1). {7.6, 12.4}
- Global gesehen ist es *wahrscheinlich*, dass die von Monsun-Systemen berührte Fläche im 21. Jahrhundert zunehmen wird. Während die Monsun-Winde *wahrscheinlich* schwächer werden, werden Monsun-Niederschläge aufgrund der

**Tabelle SPM.2** | Projizierte Änderung der mittleren globalen bodennahen Lufttemperatur und des mittleren globalen Meeresspiegelanstiegs für das mittlere und späte 21. Jahrhundert bezogen auf den Referenzzeitraum 1986–2005. {12.4; Tabelle 12.2, Tabelle 13.5}

	Szenario	2046–2065		2081–2100	
		Mittelwert	Wahrscheinlicher Bereich <sup>c</sup>	Mittelwert	Wahrscheinlicher Bereich <sup>c</sup>
<b>Globale mittlere Änderung der Oberflächentemperatur (°C)<sup>a</sup></b>	RCP2.6	1.0	0.4 bis 1.6	1.0	0.3 bis 1.7
	RCP4.5	1.4	0.9 bis 2.0	1.8	1.1 bis 2.6
	RCP6.0	1.3	0.8 bis 1.8	2.2	1.4 bis 3.1
	RCP8.5	2.0	1.4 bis 2.6	3.7	2.6 bis 4.8
	Szenario	Mittelwert	Wahrscheinlicher Bereich <sup>d</sup>	Mittelwert	Wahrscheinlicher Bereich <sup>d</sup>
<b>Anstieg des mittleren globalen Meeresspiegels (m)<sup>b</sup></b>	RCP2.6	0.24	0.17 bis 0.32	0.40	0.26 bis 0.55
	RCP4.5	0.26	0.19 bis 0.33	0.47	0.32 bis 0.63
	RCP6.0	0.25	0.18 bis 0.32	0.48	0.33 bis 0.63
	RCP8.5	0.30	0.22 bis 0.38	0.63	0.45 bis 0.82

Anmerkungen:

<sup>a</sup> Basierend auf dem CMIP5-Kollektiv; Abweichungen berechnet in Bezug auf 1986–2005. Unter Nutzung von HadCRUT4 und dessen Unsicherheitsabschätzungen (5–95%-Vertrauensintervall), beträgt die beobachtete Erwärmung seit 1850–1900 bis zum Referenzzeitraum 1986–2005 0.61 [0.55 bis 0.67] °C und 0.11 [0.09 bis 0.13] °C für 1980–1999, der Referenzzeitraum für Projektionen im AR4. Die *wahrscheinlichen* Bereiche wurden hier nicht bezüglich früheren Referenzzeiträumen beurteilt, da in der Literatur Methoden für die Kombination von Unsicherheiten in Modellen und Beobachtungen nicht generell vorhanden sind. Die Hinzunahme von projizierten und beobachteten Änderungen berücksichtigt weder mögliche Auswirkungen von systematischen Modellfehlern verglichen mit Beobachtungen, noch interne Schwankungen während des Beobachtungs-Referenzzeitraums. {2.4; 11.2; Tabellen 12.2 und 12.3}

<sup>b</sup> Basierend auf 21 CMIP5-Modellen; Abweichungen berechnet in Bezug auf 1986–2005. Dort wo CMIP5-Ergebnisse für ein bestimmtes Klimamodell (AOGCM) und Szenario nicht verfügbar waren, wurden sie wie in Kapitel 13, Tabelle 13.5 abgeschätzt. Die Beiträge von raschen dynamischen Veränderungen der Eisschilde und anthropogener Wasserspeicherung auf dem Land werden behandelt, als würden sie einheitliche Wahrscheinlichkeitsverteilungen aufweisen und als weitgehend unabhängig vom Szenario. Diese Behandlung bedeutet nicht, dass die entsprechenden Beiträge nicht vom verwendeten Szenario abhängen, sondern nur, dass der gegenwärtige Kenntnisstand keine quantitative Beurteilung dieser Abhängigkeit erlaubt. Basierend auf dem gegenwärtigen Verständnis könnte nur im Falle der Auslösung eines Zusammenbruchs von unter der Meeresoberfläche aufliegenden Teilen des Antarktischen Eisschildes ein mittlerer globaler Meeresspiegelanstieg verursacht werden, der wesentlich über dem *wahrscheinlichen* Bereich während des 21. Jahrhunderts liegt. Es gibt *mittleres Vertrauen*, dass dieser zusätzliche Beitrag mehrere zehn Zentimeter an Meeresspiegelanstieg im 21. Jahrhundert nicht übersteigen würde.

<sup>c</sup> Berechnet aus Projektionen als 5–95% Modellbereiche. Diese Bereiche werden nach Berücksichtigung zusätzlicher Unsicherheiten oder unterschiedlicher Vertrauensgrade in die Modelle als *wahrscheinliche* Bereiche beurteilt. Für Projektionen der Änderung der mittleren globalen Erdoberflächentemperatur von 2046–2065 ist das *Vertrauen mittel*, da die relative Wichtigkeit interner Schwankungen sowie Unsicherheiten in Nicht-Treibhausgas-Antrieben und -Auswirkungen größer sind als für 2081–2100. Die *wahrscheinlichen* Bereiche für 2046–2065 berücksichtigen mögliche Einflussfaktoren nicht, die zu einem geschätzten Bereich der kurzfristigen (2016–2035) Änderung der mittleren globalen Erdoberflächentemperatur führen, der tiefer liegt als der 5–95%-Modellstrebereich, da der Einfluss dieser Faktoren auf längerfristige Projektionen aufgrund von ungenügendem wissenschaftlichen Verständnis nicht quantifiziert wurden. {11.3}

<sup>d</sup> Berechnet aus Projektionen als 5–95% Modellstrebereiche. Diese Streubreiche werden nach Berücksichtigung zusätzlicher Unsicherheiten oder unterschiedlicher Vertrauensniveaus in die Modelle als *wahrscheinliche* Bereiche beurteilt. Für Projektionen der Änderung der mittleren globalen Erdoberflächentemperatur ist das *Vertrauen* für beide Zeithorizonte *mittel*.

zunehmenden atmosphärischen Feuchtigkeit *wahrscheinlich* intensiver. Der Beginn der Monsunzeit wird *wahrscheinlich* früher sein oder sich nicht stark verändern. Das Ende der Monsunzeit wird *wahrscheinlich* später sein, was in vielen Regionen zu einer Verlängerung der Monsun-Saison führt. {14.2}

- Die El Niño – Südliche Oszillation (ENSO) wird mit *hohem Vertrauen* die dominierende Form von zwischenjährlichen Schwankungen im tropischen Pazifik mit globalen Auswirkungen im 21. Jahrhundert bleiben. Aufgrund eines Anstiegs der Verfügbarkeit von Feuchtigkeit werden die mit ENSO verbundenen Niederschlagsschwankungen im regionalen Maßstab *wahrscheinlich* stärker. Natürliche Schwankungen der Stärke und räumlichen Muster von ENSO sind groß. Deshalb bleibt das *Vertrauen* in jegliche spezifische projizierte Veränderung von ENSO und damit verbundenen regionalen Phänomenen für das 21. Jahrhundert *gering*. {5.4, 14.4}

### E.3 Atmosphäre: Luftqualität

- Die Spannweite der Projektionen der Luftqualität (Ozon und PM<sub>2.5</sub><sup>17</sup> in der bodennahen Luft) wird hauptsächlich durch die Emissionen (einschließlich CH<sub>4</sub>) und weniger durch physikalischen Klimawandel (*mittleres Vertrauen*) bestimmt. Mit *hohem Vertrauen* wird die Hintergrundkonzentration von bodennahem Ozon durch die Erwärmung global verringert. Hohe CH<sub>4</sub>-Werte (wie in RCP8.5) können diese Abnahme kompensieren und die Hintergrundkonzentration des bodennahen Ozons bis zum Jahr 2100 durchschnittlich um ca. 8 ppb im Vergleich zu Szenarien mit kleinen CH<sub>4</sub>-Änderungen anheben (wie in RCP4.5, RCP6.0) (*hohes Vertrauen*). {11.3}
- Anhaltspunkte aus Beobachtungen und Modellen weisen darauf hin, dass, wenn alles andere gleich bleibt, lokal höhere Erdoberflächentemperaturen in belasteten Gebieten regionale Rückkopplungen in der Chemie und lokalen Emissionen auslösen werden, welche die Spitzenwerte von Ozon und PM<sub>2.5</sub> erhöhen werden (*mittleres Vertrauen*). Für PM<sub>2.5</sub> könnte der Klimawandel die natürlichen Aerosolquellen sowie die Auswaschung durch Niederschläge verändern, aber es kann kein Vertrauensniveau für den Gesamteinfluss des Klimawandels auf PM<sub>2.5</sub>-Verteilungen angegeben werden. {11.3}

### E.4 Ozean

**Der globale Ozean wird sich im 21. Jahrhundert weiter erwärmen. Wärme wird von der Oberfläche in den tiefen Ozean vordringen und die Ozeanzirkulation beeinflussen. {11.3, 12.4}**

- Die stärkste Ozeanerwärmung wird an der Oberfläche in den tropischen Regionen und in den Regionen der Subtropen der Nordhemisphäre projiziert. In größerer Tiefe wird die Erwärmung im Südlichen Ozean am meisten ausgeprägt sein (*hohes Vertrauen*). Die beste Abschätzung für die Ozeanerwärmung in den obersten hundert Metern liegt bei ca. 0.6 °C (RCP2.6) bis 2.0 °C (RCP8.5) und in Tiefen von ungefähr 1000 m bei ca. 0.3 °C (RCP2.6) bis 0.6 °C (RCP8.5) am Ende des 21. Jahrhunderts. {12.4, 14.3}
- Sehr wahrscheinlich* wird die Atlantische Meridionale Umwälzzirkulation (AMOC) im 21. Jahrhundert schwächer werden. Die besten Schätzwerte und Spannweiten<sup>18</sup> für die Reduktion sind 11% (1 bis 24%) in RCP2.6 und 34% (12 bis 54%) in RCP8.5. Bis 2050 wird es *wahrscheinlich* eine gewisse Abnahme in der AMOC geben, jedoch könnte die AMOC während einzelner Jahrzehnte aufgrund großer natürlicher interner Schwankungen zunehmen. {11.3, 12.4}
- Es ist *sehr unwahrscheinlich*, dass die AMOC im 21. Jahrhundert in den betrachteten Szenarien einen abrupten Übergang oder Kollaps erfahren wird. Das *Vertrauen* in die Beurteilung der Entwicklung der AMOC über das 21. Jahrhundert hinaus ist aufgrund der beschränkten Anzahl von Analysen und uneinheitlicher Resultate *gering*. Ein Kollaps jenseits des 21. Jahrhunderts kann jedoch bei starker, anhaltender Erwärmung nicht ausgeschlossen werden. {12.5}

<sup>17</sup> PM<sub>2.5</sub> bezieht sich auf Luftpartikel mit einem Durchmesser von weniger als 2.5 Mikrometer, einer Messgröße der atmosphärischen Aerosolkonzentration.

<sup>18</sup> Die Spannweiten in diesem Absatz bezeichnen die CMIP5-Modell-Spannweite.

## E.5 Kryosphäre

**Es ist sehr wahrscheinlich, dass im 21. Jahrhundert bei einem Anstieg der mittleren globalen Erdoberflächentemperatur die arktische Meereisbedeckung weiter an Fläche verlieren und ausdünnen wird und die Schneebedeckung im Frühjahr auf der Nordhemisphäre abnehmen wird. Das Gletschervolumen wird weiter zurückgehen. {12.4, 13.4}**

- Bis zum Ende des 21. Jahrhunderts werden aus den Multimodell-Mitteln ganzjährige Reduktionen des arktischen Meereises projiziert. Diese Reduktionen reichen von 43% für RCP2.6 bis 94% für RCP8.5 im September und von 8% für RCP2.6 bis 34% für RCP8.5 im Februar (*mittleres Vertrauen*) (siehe Abbildungen SPM.7 und SPM.8). {12.4}
- Basierend auf einer Auswertung einer Teilmenge von Modellen, die den mittleren klimatologischen Zustand und den Trend von 1979 bis 2012 der arktischen Meereisbedeckung am genauesten reproduzieren, ist ein nahezu eisfreier arktischer Ozean<sup>19</sup> im September beim Szenario RCP8.5 vor der Jahrhundertmitte *wahrscheinlich (mittleres Vertrauen)* (siehe Abbildungen SPM.7 und SPM.8). Eine vertrauenswürdige Projektion, wann die Arktis im 21. Jahrhundert im September nahezu eisfrei werden könnte, kann für die anderen Szenarien nicht gemacht werden. {11.3, 12.4, 12.5}
- In der Antarktis wird bei einem Anstieg der mittleren globalen Erdoberflächentemperaturen am Ende des 21. Jahrhunderts mit *geringem Vertrauen* eine Abnahme der Meereis-Ausdehnung und des Volumens projiziert. {12.4}
- Bis Ende des 21. Jahrhunderts wird eine Abnahme des globalen Gletschervolumens, die Gletscher an der Peripherie der Antarktis ausgenommen, von 15 bis 55% unter RCP2.6 und von 35 bis 85% unter RCP8.5 projiziert (*mittleres Vertrauen*). {13.4, 13.5}
- Für die Fläche der nordhemisphärischen Schneedecke im Frühjahr wird eine Abnahme um 7% für RCP2.6 und um 25% für RCP8.5 im Modellmittel für Ende des 21. Jahrhunderts projiziert (*mittleres Vertrauen*). {12.4}
- Es ist *praktisch sicher*, dass die Ausdehnung des oberflächennahen Permafrosts in höheren nördlichen Breiten bei einem Anstieg der mittleren globalen Erdoberflächentemperatur abnehmen wird. Bis zum Ende des 21. Jahrhunderts wird für das Modellmittel eine Abnahme der Fläche des oberflächennahen Permafrosts (obere 3.5 m) zwischen 37% (RCP2.6) und 81% (RCP8.5) projiziert (*mittleres Vertrauen*). {12.4}

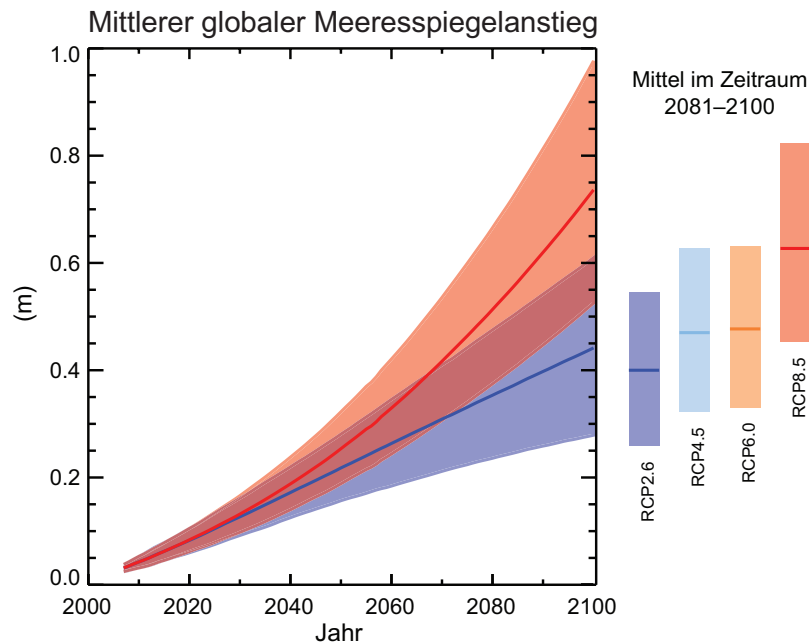
## E.6 Meeresspiegel

**Der mittlere globale Meeresspiegel wird im 21. Jahrhundert weiter ansteigen (siehe Abbildung SPM.9). Unter allen RCP-Szenarien wird die Geschwindigkeit des Meeresspiegelanstiegs die von 1971 bis 2010 beobachtete Geschwindigkeit aufgrund der zunehmenden Ozeanerwärmung und des zunehmenden Massenverlustes von Gletschern und Eisschilden *sehr wahrscheinlich übertreffen*. {13.3–13.5}**

- Das Vertrauen in Projektionen des globalen Meeresspiegelanstiegs hat seit dem AR4 aufgrund des verbesserten physikalischen Verständnisses der Komponenten des Meeresspiegels, der verbesserten Übereinstimmung von prozessbasierten Modellen mit Beobachtungen und der Einbeziehung von dynamischen Veränderungen in Eisschilden zugenommen. {13.3–13.5}
- Der mittlere globale Meeresspiegelanstieg für 2081–2100 bezogen auf 1986–2005 wird *wahrscheinlich* im Bereich von 0.26 bis 0.55 m für RCP2.6, 0.32 bis 0.63 m für RCP4.5, 0.33 bis 0.63 m für RCP6.0 und 0.45 bis 0.82 m für RCP8.5 sein (*mittleres Vertrauen*). Für RCP8.5 beträgt der Anstieg bis zum Jahr 2100 0.52 bis 0.98 m, mit einer Geschwindigkeit von

<sup>19</sup> Die Bedingungen im arktischen Ozean werden als nahezu eisfrei bezeichnet, wenn die Ausdehnung des Meereises über mindestens fünf aufeinanderfolgende Jahre weniger als 10<sup>6</sup> km<sup>2</sup> beträgt





**Abbildung SPM.9** | Projektionen des mittleren globalen Meeresspiegelanstiegs im 21. Jahrhundert bezogen auf 1986–2005, aus einer Kombination der CMIP5-Modellgruppe und prozessbasierten Modellen, für RCP2.6 und RCP8.5. Der abgeschätzte *wahrscheinliche* Bereich ist mit einem schattierten Streifen dargestellt. Die abgeschätzten *wahrscheinlichen* Bereiche für das Mittel im Zeitraum von 2081–2100 für alle RCP-Szenarien werden als farbige vertikale Balken gezeigt, mit dem entsprechenden Medianwert als horizontale Linie. Für weitere technische Details siehe Zusatzmaterial der Technischen Zusammenfassung. {Tabelle 13.5, Abbildungen 13.10 und 13.11; Abbildungen TS.21 und TS.22}

8 bis 16 mm pro Jahr zwischen 2081 bis 2100 (*mittleres Vertrauen*). Diese Bereiche wurden aus den CMIP5-Klimaprojektionen in Verbindung mit prozessbasierten Modellen und einer Literaturanalyse zu Gletscher- und Eisschild-Beiträgen abgeleitet. (siehe Abbildung SPM.9, Tabelle SPM.2). {13.5}

- In den RCP-Projektionen machen die thermische Ausdehnung 30 bis 55% des mittleren globalen Meeresspiegelanstiegs im 21. Jahrhundert aus und die Gletscher 15 bis 35%. Die Zunahme der Oberflächenschmelze des Grönländischen Eisschildes wird die Zunahme des Schneefalls übertreffen, was zu einem positiven Beitrag aus den Änderungen der Oberflächen-Massenbilanz zum zukünftigen Meeresspiegel führt (*hohes Vertrauen*). Während über dem Antarktischen Eisschild die Oberflächenschmelze gering bleiben wird, wird eine Zunahme des Schneefalls erwartet (*mittleres Vertrauen*), was zu einem negativen Beitrag der Oberflächen-Massenbilanz zum zukünftigen Meeresspiegel führt. Änderungen des Abflusses von beiden Eisschilden zusammen werden *wahrscheinlich* einen Beitrag im Bereich von 0.03 bis 0.20 m bis 2081–2100 leisten (*mittleres Vertrauen*). {13.3–13.5}
- Basierend auf dem gegenwärtigen Verständnis könnte nur im Falle der Auslösung eines Zusammenbruchs von unter der Meeresoberfläche aufliegenden Teilen des Antarktischen Eisschildes ein mittlerer globaler Meeresspiegelanstieg verursacht werden, der wesentlich über dem *wahrscheinlichen* Bereich während des 21. Jahrhunderts liegt. Allerdings gibt es *mittleres Vertrauen*, dass dieser zusätzliche Beitrag mehrere Zehntel Meter Meeresspiegelanstieg während des 21. Jahrhunderts nicht übersteigen würde. {13.4, 13.5}
- Die Basis für höhere Projektionen des mittleren globalen Meeresspiegelanstiegs im 21. Jahrhundert wurde überprüft und führte zu dem Schluss, dass es derzeit unzureichende Informationen gibt, um die Wahrscheinlichkeit von spezifischen Höhenständen oberhalb des als *wahrscheinlich* beurteilten Bereichs zu bestimmen. Viele semi-empirische Modellprojektionen des mittleren globalen Meeresspiegelanstiegs liegen höher als prozessbasierte Modellprojektionen (bis zu zweimal so hoch), jedoch gibt es keinen Konsens in der wissenschaftlichen Gemeinschaft bezüglich deren Verlässlichkeit, und deshalb ist das *Vertrauen* in deren Projektionen *gering*. {13.5}
- Der Meeresspiegelanstieg wird nicht gleichförmig sein. Bis zum Ende des 21. Jahrhunderts wird der Meeresspiegel *sehr wahrscheinlich* in mehr als 95% der Ozeanfläche ansteigen. Es wird projiziert, dass etwa 70% der Küstenlinien weltweit einen Meeresspiegelanstieg innerhalb von  $\pm 20\%$  des mittleren globalen Meeresspiegelanstiegs erfahren werden. {13.1, 13.6}

## E.7 Kohlenstoff- und andere Biogeochemische Kreisläufe

**Der Klimawandel wird die Kohlenstoffkreislauf-Prozesse in einer Weise beeinflussen, welche den Anstieg von CO<sub>2</sub> in der Atmosphäre verstärken wird (*hohes Vertrauen*). Die weitere Aufnahme von Kohlenstoff durch den Ozean wird die Ozean-Versauerung erhöhen. {6.4}**

- Die Aufnahme von anthropogenem CO<sub>2</sub> durch den Ozean wird unter allen vier RCPs bis 2100 weitergehen, mit einer größeren Aufnahme bei höheren Konzentrations-Pfaden (*sehr hohes Vertrauen*). Die zukünftige Entwicklung der Kohlenstoff-Aufnahme durch das Land ist unsicherer. Eine Mehrheit der Modelle projiziert für alle RCPs eine fortgesetzte Aufnahme von Kohlenstoff durch das Land, jedoch simulieren einige Modelle aufgrund der kombinierten Effekte von Klimawandel und Landnutzungsänderung eine Freisetzung von Kohlenstoff durch das Land. {6.4}
- Basierend auf Erdsystemmodellen ist das *Vertrauen hoch*, dass die Rückkopplung zwischen dem Klima und dem Kohlenstoffkreislauf im 21. Jahrhundert positiv ist; d.h. der Klimawandel wird die aufgrund der ansteigenden atmosphärischen CO<sub>2</sub>-Konzentration erfolgte Zunahme der Kohlenstoffsinken im Ozean und auf dem Land teilweise aufwiegen. Folglich verbleibt mehr emittiertes anthropogenes CO<sub>2</sub> in der Atmosphäre. Eine positive Rückkopplung zwischen dem Klima und dem Kohlenstoffkreislauf im Zeitmaßstab von Jahrhunderten bis Jahrtausenden wird durch paläoklimatische Beobachtungen und Modellierungen gestützt. {6.2, 6.4}

**Tabelle SPM.3** | Kumulative CO<sub>2</sub>-Emissionen für den Zeitraum von 2012 bis 2100, kompatibel mit den aus den CMIP5-Erdsystem-Modellen abgeleiteten atmosphärischen CO<sub>2</sub>-Konzentrationen der RCPs. {6.4, Tabelle 6.12, Abbildung TS.19}

Szenario	Kumulative CO <sub>2</sub> -Emissionen 2012 bis 2100 <sup>a</sup>			
	GtC		GtCO <sub>2</sub>	
	Mittelwert	Bereich	Mittelwert	Bereich
RCP2.6	270	140 bis 410	990	510 bis 1505
RCP4.5	780	595 bis 1005	2860	2180 bis 3690
RCP6.0	1060	840 bis 1250	3885	3080 bis 4585
RCP8.5	1685	1415 bis 1910	6180	5185 bis 7005

Anmerkungen:

<sup>a</sup> 1 Gigatonne Kohlenstoff = 1 GtC = 10<sup>15</sup> Gramm Kohlenstoff. Dies entspricht 3'667 GtCO<sub>2</sub>.

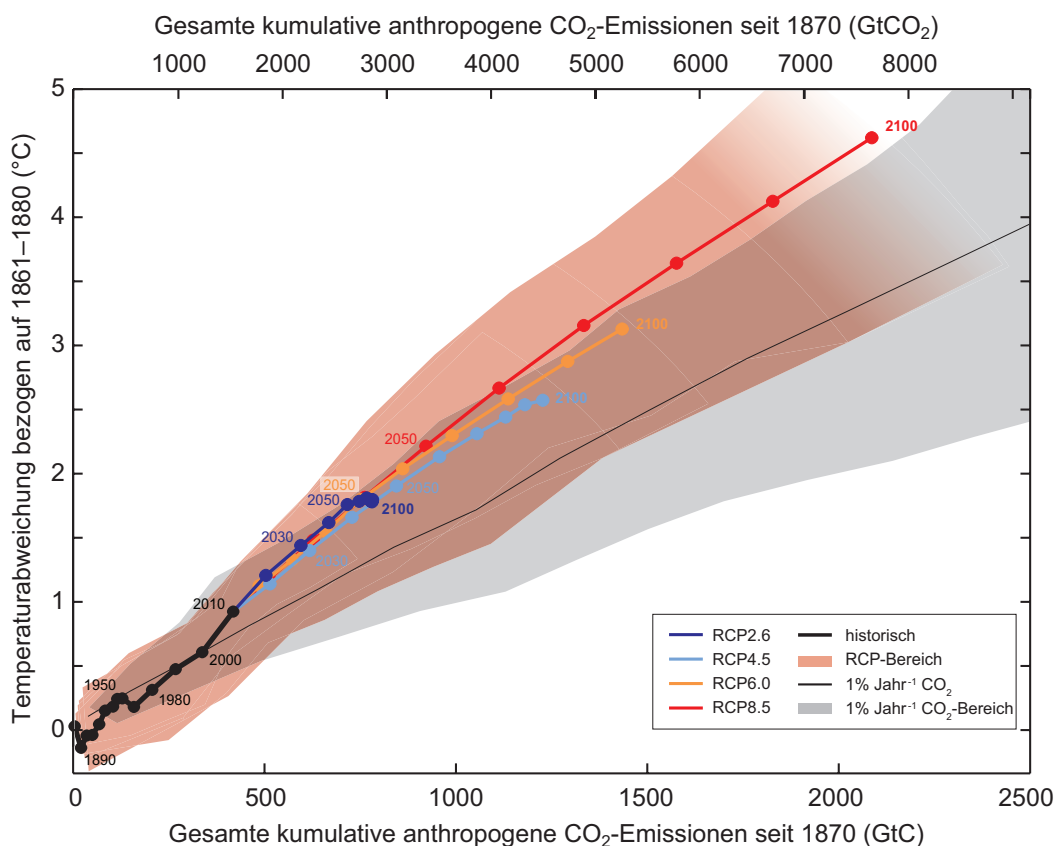
- Erdsystemmodelle projizieren für alle RCP-Szenarien einen weltweiten Anstieg der Ozeanversauerung. Die entsprechende Abnahme des Ozeanoberflächen-pH bis Ende des 21. Jahrhunderts liegt im Bereich<sup>18</sup> von 0.06 bis 0.07 für RCP2.6, 0.14 bis 0.15 für RCP4.5, 0.20 bis 0.21 für RCP6.0 und 0.30 bis 0.32 für RCP8.5 (siehe Abbildungen SPM.7 und SPM.8). {6.4}
- Die kumulativen CO<sub>2</sub>-Emissionen<sup>20</sup> für den Zeitraum von 2012 bis 2100, kompatibel mit den aus 15 CMIP5-Erdsystemmodellen abgeleiteten atmosphärischen CO<sub>2</sub>-Konzentrationen der RCPs, reichen<sup>18</sup> von 140 bis 410 GtC für RCP2.6, 595 bis 1005 GtC für RCP4.5, 840 bis 1250 GtC für RCP6.0 und 1415 bis 1910 GtC für RCP8.5 (siehe Tabelle SPM.3). {6.4}
- Bis zum Jahr 2050 sind die aus den Erdsystemmodellen unter RCP2.6 abgeleiteten jährlichen CO<sub>2</sub>-Emissionen kleiner als die Emissionen im Jahr 1990 (um 14% bis 96%). Bis Ende des 21. Jahrhunderts weisen etwa die Hälfte der Modelle Emissionen leicht über Null aus, während die andere Hälfte eine Netto-Entfernung von CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre impliziert. {6.4, Abbildung TS.19}
- Die Freisetzung von CO<sub>2</sub> und CH<sub>4</sub> in die Atmosphäre aus Kohlenstoffvorräten von auftauendem Permafrost im 21. Jahrhundert wird auf einen Bereich von 50 bis 250 GtC für RCP8.5 geschätzt (*geringes Vertrauen*). {6.4}

<sup>20</sup> Aus fossilen Brennstoffen, Zement, Industrie und Abfällen.

## E.8 Klimastabilisierung, unabwendbarer Klimawandel und Irreversibilität

Die kumulativen CO<sub>2</sub>-Emissionen bestimmen weitgehend die mittlere globale Erwärmung der Erdoberfläche bis ins späte 21. Jahrhundert und darüber hinaus (siehe Abbildung SPM.10). Die meisten Aspekte des Klimawandels werden für viele Jahrhunderte bestehen bleiben, auch wenn die Emissionen von Treibhausgasen gestoppt werden. Dies bedeutet einen unabwendbaren Klimawandel von beträchtlichem Ausmaß über mehrere Jahrhunderte hinweg, der durch vergangene, gegenwärtige und zukünftige Emissionen von CO<sub>2</sub> verursacht wird. {12.5}

- Kumulative CO<sub>2</sub>-Emissionen und die Reaktion der mittleren globalen Erdoberflächentemperatur stehen ungefähr in linearem Zusammenhang (siehe Abbildung SPM.10). Jedes Erwärmungsszenario ist mit einem Bereich von kumulativen CO<sub>2</sub>-Emissionen<sup>21</sup> verbunden. Deshalb bedingen beispielsweise höhere Emissionen in früheren Jahrzehnten später tiefere Emissionen. {12.5}



**Abbildung SPM.10** | Anstieg der mittleren globalen Erdoberflächentemperatur als Funktion der kumulativen totalen globalen CO<sub>2</sub>-Emissionen aus verschiedenen Anhaltspunkten. Multimodell-Resultate von einer Hierarchie von Klima-Kohlenstoffkreislauf-Modellen für jeden RCP bis 2100 sind mit farbigen Linien und Jahrzehnt-Mitteln (Punkte) dargestellt. Einige Jahrzehnt-Mittel sind zur besseren Übersichtlichkeit angegeben (z.B. 2050 für das Jahrzehnt 2040–2049). Die Modellresultate für den historischen Zeitraum (1860 bis 2010) werden in Schwarz angezeigt. Die farbige Fahne illustriert den Multimodell-Streubereich über die vier RCP-Szenarien und verblasst mit der abnehmenden Zahl der für RCP8.5 verfügbaren Modelle. Die von CMIP5-Modellen simulierten Multimodell-Mittel und -Bereiche, angetrieben durch einen CO<sub>2</sub>-Anstieg von 1% pro Jahr (1%-pro-Jahr-CO<sub>2</sub>-Simulationen), wird durch eine dünne schwarze Linie und eine graue Fläche wiedergegeben. Für eine spezifische Menge von kumulativen CO<sub>2</sub>-Emissionen ergeben die 1%-pro-Jahr-CO<sub>2</sub>-Simulationen eine geringere Erwärmung als die, die durch RCPs getrieben werden, welche zusätzliche Nicht-CO<sub>2</sub>-Antriebe einbeziehen. Die Temperaturwerte beziehen sich auf den Basiszeitraum von 1861–1880, die Emissionen beziehen sich auf 1870. Jahrzehnt-Mittel sind durch gerade Linien verbunden. Für weitere technische Details siehe Zusatzmaterial der Technischen Zusammenfassung. {Abbildung 12.45; TS TFE.8, Abbildung 1}

<sup>21</sup> Die Quantifizierung dieses Bereichs von CO<sub>2</sub>-Emissionen erfordert die Berücksichtigung von Nicht-CO<sub>2</sub>-Treibern.

- Die Begrenzung der allein durch anthropogene CO<sub>2</sub>-Emissionen verursachten Erwärmung seit dem Zeitraum 1861–1880<sup>22</sup> mit einer Wahrscheinlichkeit von >33%, >50% bzw. >66% auf weniger als 2 °C erfordert, dass die kumulativen CO<sub>2</sub>-Emissionen in diesem Zeitraum aus allen anthropogenen Quellen zwischen 0 und ca. 1570 GtC (5760 GtCO<sub>2</sub>), 0 und ungefähr 1210 GtC (4440 GtCO<sub>2</sub>) bzw. 0 und ungefähr 1000 GtC (3670 GtCO<sub>2</sub>) bleibt.<sup>23</sup> Diese oberen Mengen werden auf ungefähr 900 GtC (3300 GtCO<sub>2</sub>), 820 GtC (3010 GtCO<sub>2</sub>) bzw. 790 GtC (2900 GtCO<sub>2</sub>) reduziert, wenn wie in RCP2.6 die Nicht-CO<sub>2</sub>-Antriebe berücksichtigt werden. Eine Menge von 515 [445 bis 585] GtC (1890 [1630 bis 2150] GtCO<sub>2</sub>) wurde bereits bis 2011 emittiert. {12.5}
- Ein geringeres Erwärmungsziel oder eine höhere Wahrscheinlichkeit für den Verbleib unterhalb eines bestimmten Erwärmungsziels wird niedrigere kumulative CO<sub>2</sub>-Emissionen erfordern. Wenn man die Erwärmungseffekte durch den Anstieg von Nicht-CO<sub>2</sub>-Treibhausgasen berücksichtigt, wird die Reduktion der Aerosole oder eine Freisetzung von Treibhausgasen aus dem Permafrost die kumulativen CO<sub>2</sub>-Emissionen für ein bestimmtes Erwärmungsziel ebenfalls senken (siehe Abbildung SPM.10). {12.5}
- Ein Großteil des anthropogenen Klimawandels aufgrund von CO<sub>2</sub>-Emissionen ist in einem Zeithorizont von mehreren Jahrhunderten bis Jahrtausenden unumkehrbar, außer im Falle einer großen Netto-Entfernung von CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre über einen längeren Zeitraum. Die Erdoberflächentemperaturen werden über mehrere Jahrhunderte auf einem annähernd konstanten Niveau bleiben, nachdem die anthropogenen Netto-CO<sub>2</sub>-Emissionen komplett eingestellt worden sind. Aufgrund der langen Zeitskalen der Wärmeübertragung von der Ozeanoberfläche in die Tiefe wird die Ozeanerwärmung über Jahrhunderte andauern. Abhängig vom Szenario werden ca. 15 bis 40% des emittierten CO<sub>2</sub> länger als 1000 Jahre in der Atmosphäre verbleiben. {Box 6.1, 12.4, 12.5}
- Es ist *praktisch sicher*, dass der mittlere globale Meeresspiegelanstieg über das Jahr 2100 hinaus weitergehen wird, wobei der Meeresspiegelanstieg aufgrund der thermischen Ausdehnung über viele Jahrhunderte andauern wird. Die wenigen verfügbaren Modellergebnisse, die über 2100 hinausgehen, weisen darauf hin, dass der mittlere globale Meeresspiegelanstieg bis 2300 weniger als 1 m über das vorindustrielle Niveau beträgt. Dies ist bezogen auf einen Strahlungsantrieb, der CO<sub>2</sub>-Konzentrationen entspricht, die gipfeln und zurückgehen und unterhalb von 500 ppm bleiben wie in Szenario RCP2.6. Für einen Strahlungsantrieb, der einer CO<sub>2</sub>-Konzentration von mehr als 700 ppm, aber unter 1500 ppm entspricht, wie in Szenario RCP8.5, beträgt der projizierte Anstieg 1 m bis mehr als 3 m (*mittleres Vertrauen*). {13.5}
- Ein anhaltender Massenverlust von Eisschilden würde einen größeren Meeresspiegelanstieg verursachen, und ein Teil dieses Massenverlustes könnte unumkehrbar sein. Das *Vertrauen* ist *hoch*, dass eine anhaltende Erwärmung, die größer ist als ein bestimmter Schwellenwert, zu einem nahezu vollständigen Verlust des Grönländischen Eisschildes über ein Jahrtausend oder mehr führen und damit einen mittleren globalen Meeresspiegelanstieg von bis zu 7 m verursachen würde. Aktuelle Schätzungen zeigen, dass dieser Schwellenwert größer ist als ca. 1 °C (*geringes Vertrauen*), aber kleiner als ca. 4 °C (*mittleres Vertrauen*) mittlere globale Erwärmung gegenüber vorindustriell ist. Abrupter und unumkehrbarer Eisverlust durch eine potentielle Instabilität von auf dem Meeresgrund aufliegenden Teilen des Antarktischen Eisschildes als Folge des Klimaantriebes ist möglich, jedoch sind die aktuellen Hinweise und das Verständnis für eine quantitative Beurteilung ungenügend. {5.8, 13.4, 13.5}
- Es wurden Methoden vorgeschlagen, die darauf abzielen, das Klimasystem vorsätzlich zu verändern, um dem Klimawandel entgegenzuwirken (sogenanntes Geoengineering). Die beschränkten Hinweise schließen eine umfassende quantitative Beurteilung, sowohl der Regulierung der Sonnenstrahlung (SRM) als auch der Kohlendioxid-Entfernung (CDR) und deren Auswirkungen auf das Klimasystem, aus. CDR-Methoden haben bezüglich ihres Potentials auf globaler Ebene biogeochemische und technologische Grenzen. Die Kenntnisse für eine Quantifizierung, wie viele CO<sub>2</sub>-Emissionen in einer Jahrhundert-Zeitskala durch CDR teilweise kompensiert werden könnten, sind ungenügend. Modellierungen zeigen, dass SRM-Methoden, sofern realisierbar, das Potential haben, einen globalen Temperaturanstieg in wesentlichem Maß auszugleichen. Jedoch würden sie auch den globalen Wasserkreislauf verändern und die Ozeanversauerung nicht verringern. Falls die SRM aus irgendeinem Grund beendet würde, würde die globale Erdoberflächentemperatur mit *hohem Vertrauen* sehr rasch auf Werte ansteigen, die dem Treibhausgas-Antrieb entsprechen. CDR- und SRM-Methoden bringen Nebenwirkungen und Langzeit-Konsequenzen auf globaler Ebene mit sich. {6.5, 7.7}

<sup>22</sup> Die früheste von den Modellen verfügbare 20-Jahr-Periode.

<sup>23</sup> Dies beruht auf der Beurteilung der Übergangs-Klimareaktion auf kumulative Kohlenstoffemissionen (TCRE, siehe Abschnitt D.2).

### Box SPM.1: Repräsentative Konzentrations-Pfade (RCPs)

Klimawandel-Projektionen der IPCC Arbeitsgruppe I benötigen Informationen über die zukünftigen Emissionen oder Konzentrationen von Treibhausgasen, Aerosolen und anderen Klima-Treibern. Diese Information wird oft als Szenario von menschlichen Aktivitäten zum Ausdruck gebracht, die in diesem Bericht nicht beurteilt werden. Die von der Arbeitsgruppe I verwendeten Szenarien haben sich auf anthropogene Emissionen fokussiert und beinhalten keine Änderungen natürlicher Treiber wie beispielsweise des solaren oder vulkanischen Antriebs oder natürliche Emissionen, zum Beispiel von  $\text{CH}_4$  und  $\text{N}_2\text{O}$ .

Für den Fünften Sachstandsbericht des IPCC hat die Wissenschaftsgemeinschaft einen Satz von vier neuen Szenarien definiert, welche als Repräsentative Konzentrations-Pfade (RCPs, siehe Glossar) bezeichnet werden. Sie sind gekennzeichnet durch ihren ungefähren totalen Strahlungsantrieb im Jahr 2100 bezogen auf 1750:  $2.6 \text{ W m}^{-2}$  für RCP2.6,  $4.5 \text{ W m}^{-2}$  für RCP4.5,  $6.0 \text{ W m}^{-2}$  für RCP6.0 und  $8.5 \text{ W m}^{-2}$  für RCP8.5. Für die Ergebnisse aus dem Gekoppelten Modellvergleichsprojekt Phase 5 (CMIP5) sollten diese Werte lediglich als indikativ verstanden werden, da der Klimaantrieb, der aus allen Treibern resultiert, aufgrund von spezifischen Modelleigenschaften und der Handhabung von kurzlebigen Klima-Treibern zwischen den Modellen variiert. Diese vier RCPs beinhalten ein Verminderungs-Szenario, das zu einem sehr geringen Antriebsniveau führt (RCP2.6), zwei Stabilisierungs-Szenarien (RCP4.5 und RCP6.0) und ein Szenario mit sehr hohen Treibhausgasemissionen (RCP8.5). Die RCPs können so eine Spannweite von Klimapolitiken im 21. Jahrhundert repräsentieren, im Unterschied zu den Szenarien ohne Klimapolitik aus dem Sonderbericht zu Emissionsszenarien (SRES), die im Dritten und Vierten Sachstandsbericht verwendet wurden. Für RCP6.0 und RCP8.5 gipfelt der Strahlungsantrieb nicht bis zum Jahr 2100; für RCP2.6 gipfelt er und geht zurück; und für RCP4.5 wird er bis 2100 stabilisiert. Jeder RCP bietet räumlich aufgelöste Datensätze von Landnutzungsänderungen, sektor-basierten Emissionen von Luftschadstoffen und spezifiziert jährliche Treibhausgaskonzentrationen und anthropogene Emissionen bis 2100. RCPs basieren auf einer Kombination von integrierten Bewertungsmodellen, einfachen Klimamodellen, Atmosphärenchemie- und globalen Kohlenstoffkreislauf-Modellen. Während die RCPs einen weiten Bereich von totalen Antriebswerten umspannen, umfassen sie nicht die volle Spannweite von Emissionen in der Literatur, insbesondere bezüglich Aerosole.

Die meisten der CMIP5- und Erdsystemmodell-Simulationen wurden mit vorgegebenen  $\text{CO}_2$ -Konzentrationen durchgeführt, die bis zum Jahr 2100 421 ppm (RCP2.6), 538 ppm (RCP4.5), 670 ppm (RCP6.0), und 936 ppm (RCP8.5) erreichen. Unter Einbezug der vorgegebenen Konzentrationen von  $\text{CH}_4$  und  $\text{N}_2\text{O}$ , sind die kombinierten  $\text{CO}_2$ -Äquivalentkonzentrationen 475 ppm (RCP2.6), 630 ppm (RCP4.5), 800 ppm (RCP6.0) und 1313 ppm (RCP8.5). Für RCP8.5 wurden zusätzliche CMIP5-Erdsystemmodell-Simulationen mit vorgegebenen  $\text{CO}_2$ -Emissionen durchgeführt, die von integrierten Bewertungsmodellen geliefert wurden. Für alle RCPs wurden zusätzliche Berechnungen mit aktualisierten Atmosphärenchemie-Daten und -Modellen durchgeführt (einschließlich der Atmosphärenchemie- und Klimakomponenten von CMIP5), welche von den RCPs vorgegebenen Emissionen von chemisch reaktiven Gasen ( $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ , HFCs,  $\text{NO}_x$ , CO, NMVOC) verwenden. Diese Simulationen erlauben die Untersuchung von Unsicherheiten bezüglich Rückkopplungen im Kohlenstoffkreislauf und der Atmosphärenchemie.





