
Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger

Klimaänderung 2007: Wissenschaftliche Grundlagen

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

Autoren

Richard B. Alley, Terje Berntsen, Nathaniel L. Bindoff, Zhenlin Chen, Amnat Chidthaisong, Pierre Friedlingstein, Jonathan M. Gregory, Gabriele C. Hegerl, Martin Heimann, Bruce Hewitson, Brian J. Hoskins, Fortunat Joos, Jean Jouzel, Vladimir Kattsov, Ulrike Lohmann, Martin Manning, Taroh Matsuno, Mario Molina, Neville Nicholls, Jonathan Overpeck, Dahe Qin, Graciela Raga, Venkatachalam Ramaswamy, Jiawen Ren, Matilde Rusticucci, Susan Solomon, Richard Somerville, Thomas F. Stocker, Peter A. Stott, Ronald J. Stouffer, Penny Whetton, Richard A. Wood, David Wratt

Autoren von Beiträgen

J. Arblaster, G. Brasseur, J.H. Christensen, K.L. Denman, D.W. Fahey, P. Forster, E. Jansen, P.D. Jones, R. Knutti, H. Le Treut, P. Lemke, G. Meehl, P. Mote, D.A. Randall, D.A. Stone, K.E. Trenberth, J. Willebrand, F. Zwiers

Diese Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger sollte zitiert werden als:

IPCC 2007: Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger. In: Klimaänderung 2007: Wissenschaftliche Grundlagen. Beitrag der Arbeitsgruppe I zum Vierten Sachstandsbericht des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderung (IPCC), Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor und H.L. Miller, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom und New York, NY, USA. Deutsche Übersetzung durch ProClim-, österreichisches Umweltbundesamt, deutsche IPCC-Koordinationsstelle, Bern/Wien/Berlin, 2007.

Einleitung

Der Beitrag der Arbeitsgruppe I zum Vierten Sachstandsbericht des IPCC beschreibt die Fortschritte im Verständnis der anthropogenen und natürlichen Antriebskräfte der Klimaänderung,¹ der beobachteten Änderung des Klimas, von Klimaprozessen und deren Zuordnung und der Abschätzung der projizierten zukünftigen Klimaänderung. Er baut auf vergangenen IPCC Sachstandsberichten auf und integriert neue Erkenntnisse aus der Forschung der vergangenen sechs Jahre. Der Fortschritt in der Wissenschaft seit dem Dritten Sachstandsbericht (TAR) basiert auf einer grossen Menge von neuen und umfassenderen Daten, einer verfeinerten Datenauswertung, einem verbesserten Verständnis der Prozesse und deren Nachbildung in Modellen und einer ausführlicheren Untersuchung von Unsicherheitsbereichen. Die Grundlagen wesentlicher Abschnitte in dieser Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger sind in den in geschweiften Klammern angegebenen Kapitelpassagen enthalten.

Menschliche und natürliche Antriebskräfte der Klimaänderung

Änderungen in der atmosphärischen Konzentration von Treibhausgasen und Aerosolen, der Sonneneinstrahlung und der Beschaffenheit der Landoberfläche verändern die Energiebilanz des Klimasystems. Diese Änderungen werden in Form des Strahlungsantriebs² ausgedrückt, mit dessen Hilfe die wärmenden und kühlenden Einflüsse einer Anzahl von menschlichen und natürlichen Antrieben auf das globale Klima verglichen werden. Seit dem dritten Sachstandsbericht (TAR) haben neue Beobachtungen und damit verbundene Modellrechnungen von Treibhausgasen, Sonnenaktivität, Eigenschaften der Bodenoberfläche und einiger Aspekte von Aerosolen zu einer Verbesserung der quantitativen Abschätzungen des Strahlungsantriebs geführt.

Die globalen atmosphärischen Konzentrationen von Kohlendioxid, Methan und Lachgas sind als Folge menschlicher Aktivitäten seit 1750 markant gestiegen und übertreffen heute die aus Eisbohrkernen über viele Jahrtausende bestimmten vorindustriellen Werte bei Weitem (siehe Abbildung SPM.1). Der weltweite Anstieg der Kohlendioxidkonzentration ist primär auf den Verbrauch fossiler Brennstoffe und auf Landnutzungsänderungen zurückzuführen, während derjenige von Methan und Lachgas primär durch die Landwirtschaft verursacht wird. {2.3, 6.4, 7.3}

- Kohlendioxid ist das wichtigste anthropogene Treibhausgas (siehe Abbildung SPM.2). Die globale atmosphärische Kohlendioxidkonzentration ist von einem vorindustriellen Wert von etwa 280 ppm auf 379 ppm³ im Jahre 2005 angestiegen. Die atmosphärische Kohlendioxidkonzentration im Jahre 2005 übertrifft die aus Eisbohrkernen bestimmte natürliche Bandbreite der letzten 650'000 Jahre (180 bis 300 ppm) bei Weitem. Die jährliche Wachstumsrate der Kohlendioxidkonzentration war in den letzten 10 Jahren (Durchschnitt 1995–2005: 1,9 ppm pro Jahr) größer als in der Zeit seit Beginn der kontinuierlichen direkten atmosphärischen Messungen (Durchschnitt 1960–2005: 1,4 ppm pro Jahr), auch wenn die Wachstumsrate von Jahr zu Jahr schwankt. {2.3, 7.3}
- Die Hauptquelle der erhöhten atmosphärischen Kohlendioxidkonzentration seit der vorindustriellen Zeit ist der Verbrauch fossiler Brennstoffe, wobei Landnutzungsänderungen einen weiteren signifikanten, aber kleineren Beitrag liefern. Die jährlichen fossilen Kohlendioxidemissionen⁴ stiegen von durchschnittlich 6,4 [6,0 bis 6,8]⁵ GtC (23,5 [22,0 bis 25,0] GtCO₂) pro Jahr in den 1990er Jahren auf 7,2 [6,9 bis 7,5] GtC (26,4 [25,3 bis 27,5] GtCO₂) pro Jahr von 2000–2005 (2004- und 2005-Daten sind vorläufige Schätzungen). Die mit Landnutzungsänderungen verbundenen Kohlen-

¹ Klimaänderung bezieht sich im Sprachgebrauch des IPCC auf jegliche Klimaänderung im Verlauf der Zeit, sei es aufgrund natürlicher Schwankungen oder als Folge menschlicher Aktivitäten. Dieser Gebrauch unterscheidet sich von demjenigen der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen, wo unter Klimaänderung eine Änderung des Klimas verstanden wird, die direkt oder indirekt menschlichen Aktivitäten, welche die Zusammensetzung der Erdatmosphäre verändern, zugeordnet werden kann und die zu den über vergleichbare Zeiträume beobachteten natürlichen Klimaschwankungen hinzukommt.

² Der Strahlungsantrieb ist ein Maß für den Einfluss, den ein Faktor auf die Änderung des Gleichgewichts von einfallender und abgehender Energie im System Erde-Atmosphäre hat, und ist ein Index für die Bedeutung eines Faktors als potentieller Mechanismus einer Klimaänderung. Ein positiver Antrieb führt tendenziell zur Erwärmung der Erdoberfläche während ein negativer Antrieb tendenziell zu einer Abkühlung führt. In diesem Bericht sind die Werte für den Strahlungsantrieb für das Jahr 2005, bezogen auf vorindustrielle Werte im Jahr 1750, definiert und werden in Watt pro Quadratmeter (Wm⁻²) ausgedrückt. Siehe Glossar und Kapitel 2.2 für weitere Details.

³ ppm (Teile pro Million) oder ppb (Teile pro Milliarde) ist das Verhältnis der Anzahl von Treibhausgasmolekülen zur Gesamtzahl der Moleküle in trockener Luft. 300 ppm bedeutet zum Beispiel 300 Treibhausgasmoleküle pro Million Moleküle trockener Luft.

⁴ Fossile Kohlendioxidemissionen beinhalten diejenigen aus Produktion, Verteilung und Verbrauch von fossilen Brennstoffen sowie als Nebenprodukt der Zementproduktion. Die Emission von 1 GtC entspricht 3,67 GtCO₂.

⁵ Im Allgemeinen werden Unsicherheitsbereiche von Ergebnissen in dieser Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger, sofern nicht anderweitig deklariert, als 90%-Unsicherheits-Intervalle angegeben das heisst, es gibt eine geschätzte 5-prozentige Wahrscheinlichkeit, dass der Wert oberhalb des in eckigen Klammern genannten Bereichs liegen könnte und eine 5-prozentige Wahrscheinlichkeit, dass der Wert unterhalb dieses Bereichs liegen könnte. Ein bester Schätzwert ist aufgeführt sofern vorhanden. Die geschätzten Unsicherheitsintervalle sind nicht immer symmetrisch zum entsprechenden besten Schätzwert. Es ist zu beachten, dass eine Anzahl von Unsicherheitsbereichen im TAR der Arbeitsgruppe I auf der Basis von Expertenbeurteilung einem 2-Standardabweichungs-Bereich (95%) entsprachen.

ÄNDERUNGEN DER TREIBHAUSGASE BASIEREND AUF EISBOHRKERNEN UND MODERNEN DATEN

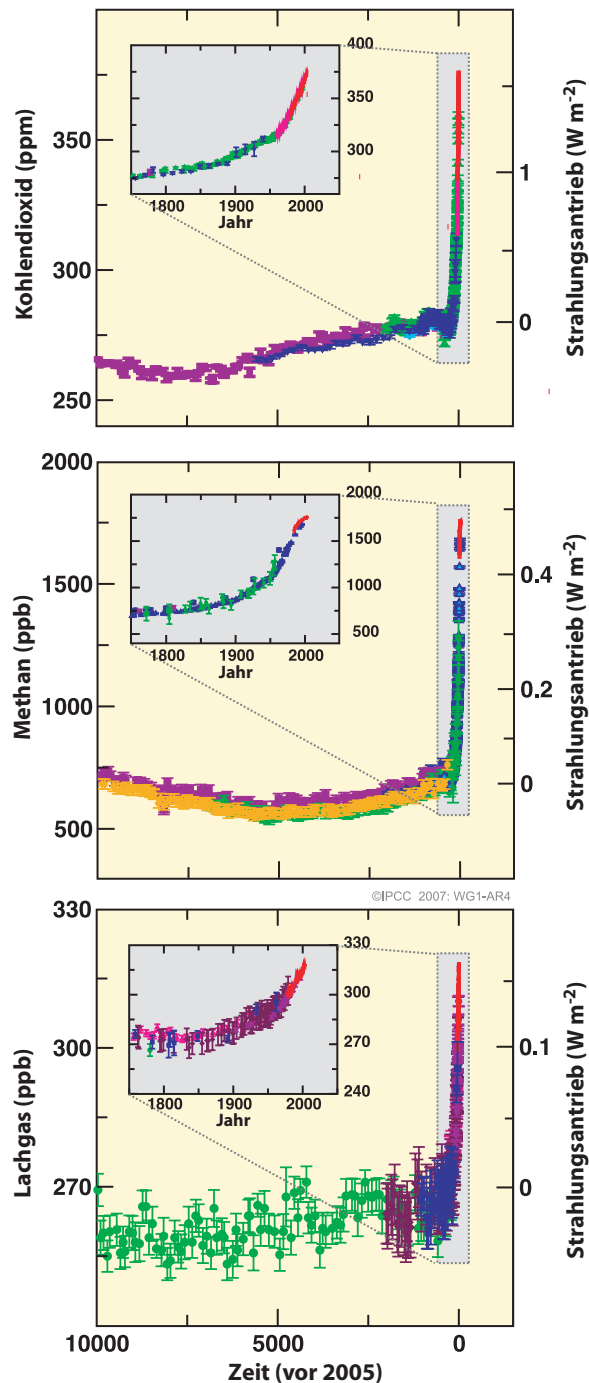


ABBILDUNG SPM.1. Atmosphärische Konzentrationen von Kohlendioxid, Methan und Lachgas in den letzten 10'000 Jahren (große Grafiken) und seit 1750 (eingefügte Grafiken). Dargestellt sind Messungen aus Eisbohrkernen (Symbole mit verschiedenen Farben für unterschiedliche Studien) und atmosphärischen Proben (rote Linien). Die entsprechenden Strahlungsantriebe sind auf der rechten Achse der großen Grafiken angegeben. {Abbildung 6.4}

dioxidemissionen werden auf 1,6 [0,5 bis 2,7] GtC (5,9 [1,8 bis 9,9] GtCO₂) pro Jahr in den 1990er Jahren geschätzt, wobei diese Schätzungen große Unsicherheiten aufweisen. {7.3}

- Die globale atmosphärische Methan-Konzentration ist von einem vorindustriellen Wert von etwa 715 ppb auf 1732 ppb in den frühen 1990er Jahre gestiegen und liegt 2005 bei 1774 ppb. Die atmosphärische Methan-Konzentration im Jahr 2005 übertrifft die aus Eisbohrkernen bestimmte natürliche Bandbreite der letzten 650'000 Jahre (320 bis 790 ppb) bei Weitem. Die Wachstumsraten haben seit den frühen 1990er Jahren im Einklang mit den nahezu gleich gebliebenen gesamten Emissionen (Summe der anthropogenen und natürlichen Quellen) abgenommen. Es ist *sehr wahrscheinlich*,⁶ dass der beobachtete Anstieg der Methan-Konzentration auf menschliche Aktivitäten, vor allem Landwirtschaft und Verbrauch fossiler Brennstoffe, zurückzuführen ist, aber die jeweiligen Beiträge von verschiedenen Quellentypen sind nicht gut bestimmt. {2.3, 7.4}
- Die globale atmosphärische Lachgas-Konzentration ist von einem vorindustriellen Wert von etwa 270 ppb auf 319 ppb im Jahr 2005 angestiegen. Die Wachstumsrate ist seit 1980 ungefähr konstant. Mehr als ein Drittel aller Lachgasemissionen sind anthropogen und primär durch die Landwirtschaft verursacht. {2.3, 7.4}

Das Verständnis der erwärmenden und kühlenden anthropogenen Einflüsse auf das Klima hat sich seit dem Dritten Sachstandsbericht (TAR) verbessert und zu einem *sehr hohen Vertrauen* geführt⁷, daß der globale durchschnittliche Netto-Effekt der menschlichen Aktivitäten seit 1750 eine Erwärmung war, mit einem Strahlungsantrieb von +1,6 [+0,6 bis +2,4] W m⁻² (siehe Abbildung SPM.2). {2.3, 6.5, 2.9}

- Der gesamte Strahlungsantrieb aufgrund des Anstiegs von Kohlendioxid-, Methan- und Lachgas beträgt +2,30

⁶ In dieser Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger werden auf der Basis von Expertenbeurteilungen die folgenden Ausdrücke für die Bezeichnung der geschätzten Wahrscheinlichkeit von Ergebnissen oder Resultaten verwendet: *praktisch sicher* > 99% Eintrittswahrscheinlichkeit, *äußerst wahrscheinlich* > 95%, *sehr wahrscheinlich* > 90%, *wahrscheinlich* > 66%, *eher wahrscheinlich als nicht* > 50%, *unwahrscheinlich* < 33%, *sehr unwahrscheinlich* < 10%, *äußerst unwahrscheinlich* < 5%. (Siehe Kasten TS 1.1 für mehr Details).

⁷ In dieser Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger werden die folgenden Begriffe verwendet, um die Beurteilung der Richtigkeit der zugrunde liegenden Wissenschaft durch die Experten auszudrücken: *Sehr hohes Vertrauen*: Die Aussage ist in mindestens 9 von 10 Fällen richtig; *hohes Vertrauen*: Die Aussage ist in etwa 8 aus 10 Fällen richtig. (Siehe Kasten TS-1.1)

[+2,07 bis +2,53] W m⁻², und seine Wachstumsrate während des Industriezeitalters ist *sehr wahrscheinlich* seit über 10'000 Jahren beispiellos (siehe Abbildungen SPM.1 und SPM.2). Der Strahlungsantrieb durch Kohlendioxid ist zwischen 1995 und 2005 um 20% gewachsen, was die größte Änderung innerhalb eines Jahrzehnts während mindestens der letzten 200 Jahre darstellt. {2.3, 6.4}

- Die anthropogenen Beiträge zu den Aerosolen (vor allem Sulfat, organischer Kohlenstoff, Russ, Nitrat und Staub) erzeugen zusammengekommen einen kühlenden Effekt, mit einem gesamten direkten Strahlungsantrieb von -0,5 [-0,9 bis -0,1] W m⁻² und einem indirekten

Strahlungsantrieb durch die Albedo von Wolken von -0,7 [-1,8 bis -0,3] W m⁻². Diese Antriebe sind dank verbesserter Messungen *vor Ort*, Satelliten- und bodengestützter Messungen sowie umfassender Modellierungen nun besser verstanden als zur Zeit des TAR. Sie stellen jedoch weiterhin die dominierende Unsicherheit im Strahlungsantrieb dar. Aerosole beeinflussen auch die Lebensdauer von Wolken und die Niederschläge. {2.4, 2.9, 7.5}

- Mehrere weitere Quellen liefern signifikante anthropogene Beiträge zum Strahlungsantrieb. Änderungen des troposphärischen Ozons aufgrund der Emission von ozonbildenden Chemikalien (Stickstoffoxide,

KOMPONENTEN DES STRAHLUNGSANTRIEBS

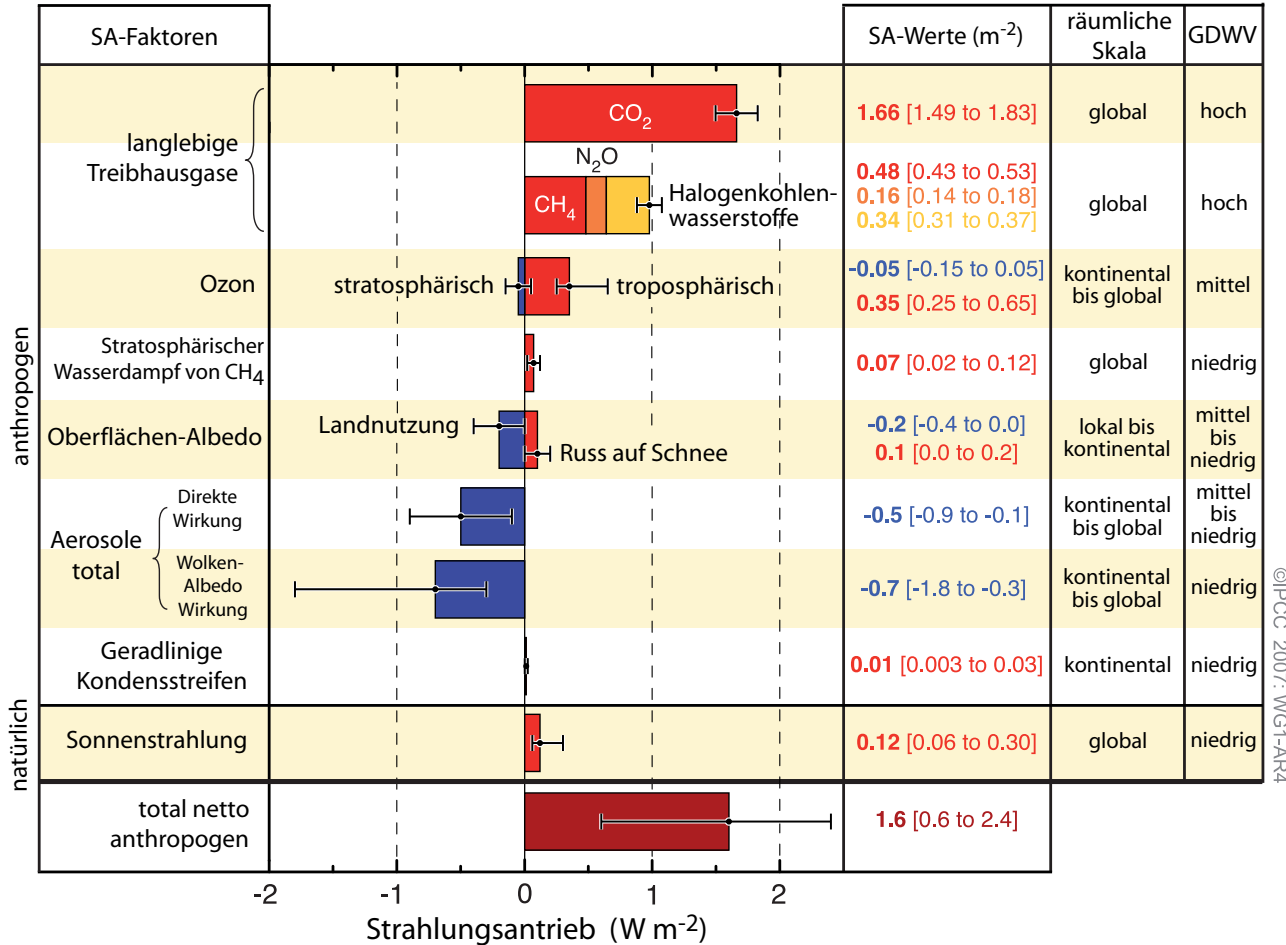


ABBILDUNG SPM.2. Schätzungen und Bandbreiten des global gemittelten Strahlungsantriebs (SA) im Jahr 2005 für anthropogenes Kohlendioxid (CO₂), Methan (CH₄), Lachgas (N₂O) und andere wichtige Faktoren und Mechanismen, zusammen mit der typischen geographischen Ausdehnung (räumliche Skala) des Antriebs und der Beurteilung des Grades des wissenschaftlichen Verständnisses (GDVV). Der Nettobetrag und die Bandbreite des anthropogenen Strahlungsantriebs sind ebenfalls angeführt. Deren Berechnung benötigt die Summierung von asymmetrischen Unsicherheitsabschätzungen der einzelnen Faktoren und kann deshalb nicht durch einfache Addition durchgeführt werden. Für weitere hier nicht aufgeführte Strahlungsantriebe wird das GDVV als sehr niedrig eingeschätzt. Vulkanische Aerosole wirken als zusätzlicher natürlicher Antrieb, sind aber aufgrund ihres episodischen Charakters in dieser Abbildung nicht berücksichtigt. Der Bereich für geradlinige Kondensstreifen schließt andere mögliche Effekte des Luftverkehrs auf die Bewölkung nicht ein. {2.9, Abbildung 2.20}

Kohlenmonoxid und Kohlenwasserstoffe) tragen $+0,35$ [$+0,25$ bis $+0,65$] W m^{-2} bei. Der direkte Strahlungsantrieb durch Veränderungen bei den Halogenkohlenwasserstoffen⁸ beträgt $+0,34$ [$+0,31$ bis $+0,37$] W m^{-2} . Änderungen in der Albedo der Bodenoberfläche bedingt durch Änderungen in der Bodenbedeckung sowie die Ablagerung von Russpartikeln auf Schnee verursachen Antriebe von $-0,2$ [$-0,4$ bis $0,0$] W m^{-2} , beziehungsweise $+0,1$ [$0,0$ bis $+0,2$] W m^{-2} . Weitere Beiträge kleiner als $\pm 0,1$ W m^{-2} sind in Abbildung SPM.2 aufgeführt. {2.3, 2.5, 7.2}

- Der seit 1750 durch Änderungen der Sonneneinstrahlung verursachte Strahlungsantrieb wird auf $+0,12$ [$+0,06$ bis $+0,30$] W m^{-2} geschätzt. Dies ist weniger als die Hälfte der im TAR aufgeführten Schätzung. {2.7}

Direkte Beobachtung neuester Klimaänderungen

Seit dem TAR wurden durch Verbesserungen und Erweiterungen zahlreicher Datensätze und Datenanalysen, durch breitere geographische Abdeckung, besseres Verständnis von Unsicherheiten und einer breiteren Auswahl von Messverfahren Fortschritte im Verständnis erreicht, wie sich das Klima in Raum und Zeit verändert. Seit den 1960er Jahren stehen zunehmend umfassendere Beobachtungen der Gletscher und der Schneebedeckungen sowie seit rund 10 Jahren der Meeresspiegelhöhe und der Eisschilder zur Verfügung. Trotzdem bleibt der Datenumfang in einigen Regionen begrenzt.

Die Erwärmung des Klimasystems ist eindeutig, wie dies nun aufgrund der Beobachtungen des Anstiegs der mittleren globalen Luft- und Meerestemperaturen, des ausgedehnten Abschmelzens von Schnee und Eis und des Anstiegs des mittleren globalen Meeresspiegels offensichtlich ist (siehe Abbildung SPM.3). {3.2, 4.2, 5.5}

- Elf der letzten zwölf Jahre (1995–2006) gehören zu den zwölf wärmsten Jahren seit der instrumentellen Messung der globalen Erdoberflächentemperatur⁹ (seit 1850). Der aktualisierte 100jährige lineare Trend (1906–2005) von

$0,74$ [$0,56$ bis $0,92$] $^{\circ}\text{C}$ ist deshalb größer als der im TAR aufgeführte entsprechende Trend für 1901–2000 von $0,6$ [$0,4$ bis $0,8$] $^{\circ}\text{C}$. Der lineare Erwärmungstrend über die letzten 50 Jahre ($0,13$ [$0,10$ bis $0,16$] $^{\circ}\text{C}$ pro Jahrzehnt) ist fast zweimal so groß wie derjenige über die letzten 100 Jahre. Der gesamte Temperaturanstieg von 1850–1899 bis 2001–2005 beträgt $0,76$ [$0,57$ bis $0,95$] $^{\circ}\text{C}$. Es existieren städtische Wärmeinsel-Effekte, sie sind aber lokal und haben einen vernachlässigbaren Einfluss (weniger als $0,006$ $^{\circ}\text{C}$ pro Jahrzehnt über Land und Null über dem Ozean) auf diese Werte. {3.2}

- Neue Analysen von ballon- und satellitengestützten Temperaturmessungen in der unteren und mittleren Troposphäre zeigen ähnliche Erwärmungsraten wie die Aufzeichnungen der Erdoberflächentemperatur und stimmen im Rahmen der jeweiligen Unsicherheiten mit diesen überein. Damit wird eine im TAR festgehaltene Unstimmigkeit weitgehend ausgeräumt. {3.2, 3.4}
- Der durchschnittliche atmosphärische Wasserdampfgehalt ist mindestens seit den 1980er Jahren sowohl über dem Land und den Ozeanen als auch in der oberen Troposphäre angestiegen. Die Zunahme steht weitgehend im Einklang mit dem zusätzlichen Wasserdampf, den wärmere Luft aufnehmen kann. {3.4}
- Die Beobachtungen seit 1961 zeigen, dass die durchschnittliche Temperatur des Weltozeans bis in Tiefen von mindestens 3000 m angestiegen ist und dass der Ozean mehr als 80% der dem Klimasystem zugeführten Wärme absorbiert hat. Diese Erwärmung führt zu einer Ausdehnung des Meerwassers und trägt zum Anstieg des Meeresspiegels bei (Tabelle SPM.1). {5.2, 5.5}
- Gebirgsgletscher und Schneebedeckung haben im Mittel in beiden Hemisphären abgenommen. Die weit verbreitete Abnahme der Gletscher und Eiskappen hat zum Meeresspiegelanstieg beigetragen (Eiskappen schließen die Beiträge der grönländischen und antarktischen Eisschilde nicht mit ein) (siehe Tabelle SPM.1). {4.6, 4.7, 4.8, 5.5}
- Neue Daten seit dem TAR zeigen, dass die Verluste der Eisschilde in Grönland und der Antarktis *sehr wahrscheinlich* zum Meeresspiegelanstieg zwischen 1993 und 2003 beigetragen haben (Tabelle SPM.1). Die Fließgeschwindigkeit einiger grönländischer und antarktischer Gletscher, die Eis aus dem Inneren der

⁸ Der Strahlungsantrieb durch Halogenkohlenwasserstoffe wurde kürzlich im IPCC-Sonderbericht über den Schutz der Ozonschicht und das globale Klimasystem (2005) beurteilt.

⁹ Der Durchschnitt der bodennahen Lufttemperatur über dem Land und der Meeresoberflächentemperatur.

ÄNDERUNGEN VON TEMPERATUR, MEERESSPIEGEL UND NORDHEMISPHÄRISCHER SCHNEEBEDECKUNG

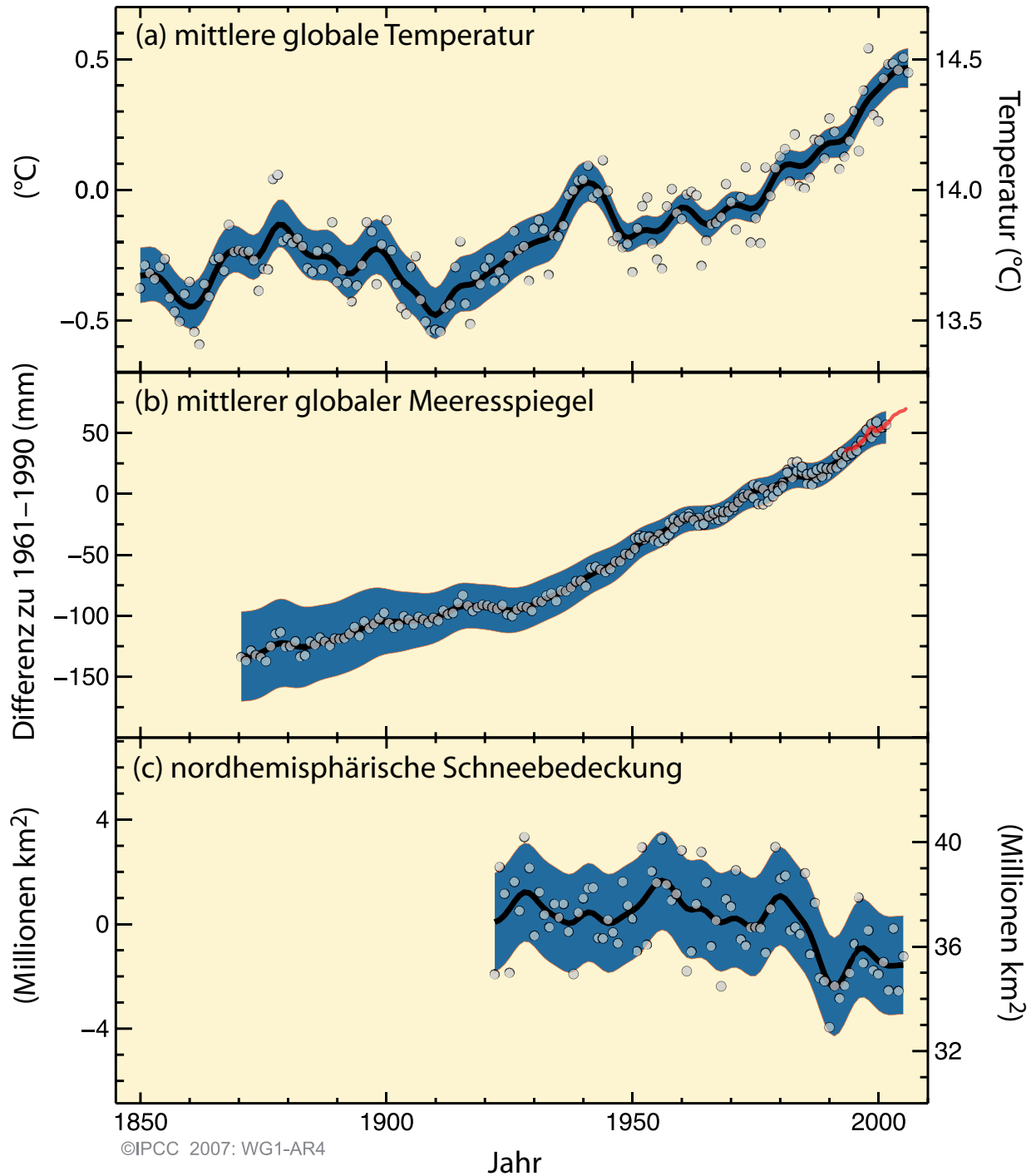


ABBILDUNG SPM.3. Beobachtete Änderungen (a) der mittleren globalen Erdoberflächentemperatur; (b) des mittleren globalen Meeresspiegelanstiegs aus Pegelmessungen (blau) und Satellitendaten (rot) und (c) der nordhemisphärischen Schneebedeckung im März und April. Alle Änderungen beziehen sich auf das Mittel des Zeitraums 1961–1990. Die geglätteten Kurven repräsentieren die über ein Jahrzehnt gemittelten Werte, während Kreise die Jahreswerte darstellen. Die schattierten Flächen zeigen die geschätzten Unsicherheitsbereiche aufgrund einer umfangreichen Analyse bekannter Unsicherheiten (a und b) und aus den Zeitreihen (c). {FAQ 3.1, Abbildung 1, Abbildung 4.2 und Abbildung 5.13}

Eisschilde ableiten (Auslassgletscher), ist angestiegen. Der damit verbundene Massenverlust der Eisschilder ist häufig auf die Ausdünnung, den Abbau oder den Verlust von Schelfeis oder den Verlust einer schwimmenden Gletscherzunge zurückzuführen. Ein solcher dynamischer Eisverlust reicht aus zur Erklärung des größten Teils des Netto-Massenverlustes in der Antarktis und ungefähr der Hälfte des Massenverlustes in Grönland. Der Rest des Massenverlustes in Grönland ist entstanden, weil die Verluste durch das Abschmelzen größer waren als der Zuwachs durch Schneefall. {4.6, 4.8, 5.5}

- Der mittlere globale Meeresspiegel ist von 1961 bis 2003 mit einer durchschnittlichen Geschwindigkeit von 1.8 [1.3 bis 2.3] mm pro Jahr gestiegen. Die Geschwindigkeit war zwischen 1993 und 2003 mit ungefähr 3.1 [2.4 bis 3.8] mm pro Jahr größer. Es ist unklar, ob die größere Geschwindigkeit von 1993–2003 eine dekadische Schwankung oder eine Zunahme des langfristigen Trends widerspiegelt. Mit *hohem Vertrauen* hat die Geschwindigkeit des Meeresspiegelanstiegs vom 19. zum 20. Jahrhundert zugenommen. Der gesamte Anstieg im 20. Jahrhundert beträgt geschätzte 0.17 [0.12 bis 0.22] m. {5.5}
- Die Summe der Klimabeiträge ist für 1993–2003 mit dem direkt beobachteten Meeresspiegelanstieg im Rahmen der Unsicherheiten im Einklang (siehe Tabelle SPM.1). Diese Schätzungen basieren auf nun

vorhandenen verbesserten Satelliten- und Vor-Ort-Messungen. Für den Zeitraum von 1961 bis 2003 ist die Summe der geschätzten Klimabeiträge kleiner als der beobachtete Meeresspiegelanstieg. Der TAR enthielt eine ähnliche Unstimmigkeit für 1910 bis 1990. {5.5}

Auf der Skala von Kontinenten, Regionen und Ozeanbecken wurden zahlreiche langfristige Änderungen des Klimas beobachtet. Zu diesen gehören Änderungen der Temperaturen und des Eises in der Arktis sowie verbreitet Änderungen in den Niederschlagsmengen, im Salzgehalt der Ozeane, in Windmustern und bei Aspekten von extremen Wetterereignissen wie Trockenheit, Starkniederschlägen, Hitzewellen und der Intensität von tropischen Wirbelstürmen.¹⁰ {3.2, 3.3, 3.4, 3.5, 3.6, 5.2}

- Die durchschnittlichen Temperaturen in der Arktis sind in den letzten 100 Jahren fast doppelt so schnell gestiegen wie im globalen Mittel. Die arktischen Temperaturen weisen eine hohe dekadische Variabilität auf, so wurde auch von 1925 bis 1945 eine warme Periode beobachtet. {3.2}
- Aus den Satellitendaten seit 1978 ist ersichtlich, dass die durchschnittliche jährliche Ausdehnung des

Tabelle SPM.1. Beobachtete Geschwindigkeit des Meeresspiegelanstiegs und die geschätzten Beiträge verschiedener Quellen {5.5, Tabelle 5.3}

Ursache des Meeresspiegelanstiegs	Geschwindigkeit des Meeresspiegelanstiegs (mm pro Jahr)	
	1961–2003	1993–2003
Thermische Ausdehnung	0.42 ± 0.12	1.6 ± 0.5
Gletscher und Eiskappen	0.50 ± 0.18	0.77 ± 0.22
Grönländischer Eisschild	0.05 ± 0.12	0.21 ± 0.07
Antarktischer Eisschild	0.14 ± 0.41	0.21 ± 0.35
Summe der individuellen Klimabeiträge zum Meeresspiegelanstieg	1.1 ± 0.5	2.8 ± 0.7
Beobachteter gesamter Meeresspiegelanstieg	1.8 ± 0.5 ^a	3.1 ± 0.7 ^a
Differenz (Beobachtungen minus die Summe der geschätzten Klimabeiträge)	0.7 ± 0.7	0.3 ± 1.0

Bemerkung:

^a Daten vor 1993 stammen von Pegelstandsmessungen und nach 1993 aus der Satellitenaltimetrie.

¹⁰ Tropische Wirbelstürme schließen Hurrikane und Taifune ein.

arktischen Meereises um 2,7 [2,1 bis 3,3]% pro Jahrzehnt geschrumpft ist, wobei die Abnahme im Sommer mit 7,4 [5,0 bis 9,8]% pro Jahrzehnt größer ist. Diese Zahlen sind im Einklang mit denjenigen im TAR. {4.4}

- Die Temperaturen an der Obergrenze der Permafrostschicht sind in der Arktis seit den 1980er Jahren allgemein gestiegen (um bis zu 3 °C). Die maximale Ausdehnung der Fläche mit saisonal gefrorenem Boden hat in der Nordhemisphäre seit 1990 um etwa 7% abgenommen, bei einer Abnahme von bis zu 15% im Frühjahr. {4.7}

- Für viele großräumige Regionen zeigen die Niederschlagsmengen langfristige Trends von 1900 bis 2005¹¹. Signifikante Niederschlagszunahmen wurden in östlichen Teilen von Nord- und Südamerika, im Norden Europas und in Nord und Zentralasien beobachtet. Der Sahel, der Mittelmeerraum, das südliche Afrika und Teile von Südasien sind trockener geworden. Die Niederschläge schwanken räumlich und zeitlich sehr stark, und in einigen Regionen sind nicht genügend Daten vorhanden. In den anderen untersuchten großräumigen Regionen wurden keine langfristigen Trends beobachtet.¹¹ {3.3, 3.9}

Tabelle SPM.2. Kürzliche Trends, Wissensstand bezüglich des menschlichen Einflusses auf den Trend und Projektionen für extreme Wetterereignisse, für die im 20. Jahrhundert ein Trend beobachtet wurde. {Tabellen 3.7, 3.8, 9.4, Abschnitte 3.8, 5.5, 9.7, 11.2–11.9}

Phänomen ^a und Richtung des Trends	Wahrscheinlichkeit, dass ein Trend im späten 20. Jahrhundert (typischerweise nach 1960) auftrat	Wahrscheinlichkeit eines anthropogenen Beitrages zum beobachteten Trend ^b	Wahrscheinlichkeit eines zukünftigen Trends, basierend auf den Projektionen für das 21. Jahrhundert unter Verwendung der SRES-Szenarien
Wärmere und weniger kalte Tage und Nächte über den meisten Landflächen	<i>Sehr wahrscheinlich^c</i>	<i>Wahrscheinlich^d</i>	<i>Praktisch sicher^d</i>
Wärmere und häufigere heiße Tage und Nächte über den meisten Landflächen	<i>Sehr wahrscheinlich^e</i>	<i>Wahrscheinlich (Nächte)^d</i>	<i>Praktisch sicher^d</i>
Wärmeperioden / Hitzewellen. Zunahme der Häufigkeit über den meisten Landflächen	<i>Wahrscheinlich</i>	<i>Eher wahrscheinlich als nicht^f</i>	<i>Sehr wahrscheinlich</i>
Starkniederschlagsereignisse. Die Häufigkeit (oder der Anteil der Starkniederschläge am Gesamtniederschlag) nimmt über den meisten Gebieten zu	<i>Wahrscheinlich</i>	<i>Eher wahrscheinlich als nicht^f</i>	<i>Sehr wahrscheinlich</i>
Von Dürren betroffene Flächen nehmen zu	<i>Wahrscheinlich in vielen Regionen seit 1970</i>	<i>Eher wahrscheinlich als nicht</i>	<i>Wahrscheinlich</i>
Die Aktivität starker tropischer Wirbelstürme nimmt zu	<i>Wahrscheinlich in vielen Regionen seit 1970</i>	<i>Eher wahrscheinlich als nicht^f</i>	<i>Wahrscheinlich</i>
Zunehmendes Auftreten von extrem hohem Meeresspiegel (ausgenommen Tsunamis) ^g	<i>Wahrscheinlich</i>	<i>Eher wahrscheinlich als nicht^{f,h}</i>	<i>Wahrscheinlichⁱ</i>

Bemerkungen:

^a Siehe Tabelle 3.7 für weitere Details bezüglich Definitionen.

^b Siehe Tabelle TS.4, Kasten TS.3.4 und Tabelle 9.4.

^c Abnehmende Häufigkeit von kalten Tagen und Nächten (kälteste 10%).

^d Erwärmung der extremsten Tage und Nächte jeden Jahres.

^e Zunehmende Häufigkeit von heißen Tagen und Nächten (heißeste 10%).

^f Die Größe der anthropogenen Beiträge wurde nicht untersucht. Die Zuordnung für diese Phänomene basiert mehr auf Experteneinschätzung als auf formellen Zuordnungsstudien.

^g Extrem hohe Meeresspiegel hängen vom mittleren Meeresspiegel und regionalen Wettersystemen ab. Sie sind hier definiert als die höchsten 1% der stündlichen an einer Station beobachteten Meeresspiegel für einen bestimmten Bezugszeitraum.

^h Änderungen in den beobachteten extrem hohen Meeresspiegeln folgen den Änderungen des mittleren Meeresspiegels sehr genau {5.5}. Es ist *sehr wahrscheinlich*, dass menschliche Aktivitäten zum Anstieg des mittleren Meeresspiegels beigetragen haben. {9.5}

ⁱ Der projizierte mittlere globale Meeresspiegel für 2100 liegt in allen Szenarien höher als im Bezugszeitraum. {10.6} Die Auswirkungen von Veränderungen der regionalen Wettersysteme auf extreme Meeresspiegel wurde nicht untersucht.

¹¹ Die untersuchten Regionen entsprechen denjenigen des TAR-Kapitels über die regionalen Projektionen und des Kapitels 11 dieses Berichts.

- Der Salzgehalt im Wasser der mittleren und hohen Breiten nimmt ab, während er im Wasser der niedrigen Breiten zunimmt. Dies deutet auf Änderungen von Niederschlag und Verdunstung über den Ozeanen hin. {5.2}
- Die Westwinde in den mittleren Breiten sind in beiden Hemisphären seit den 1960er Jahren stärker geworden. {3.5}
- Seit den 1970er Jahren wurden insbesondere in den Tropen und Subtropen intensivere und länger andauernde Dürren über größeren Gebieten beobachtet. Zunehmende Austrocknung in Verbindung mit höheren Temperaturen und abnehmenden Niederschlägen hat zu diesen Veränderungen der Dürren beigetragen. Auch Änderungen der Meeresoberflächentemperatur (SST) und der Windmuster sowie die Abnahme der Schneemassen und Schneebedeckung wurden mit Dürren in Verbindung gebracht. {3.3}
- Die Häufigkeit von Starkniederschlagsereignissen hat über den meisten Landflächen zugenommen, im Einklang mit der Erwärmung und der beobachteten Zunahme des atmosphärischen Wasserdampfes. {3.8, 3.9}
- In den letzten 50 Jahren wurden weit verbreitete Änderungen bei den Temperaturextremen beobachtet. Kalte Tage, kalte Nächte und Frost sind weniger häufig geworden, während heiße Tage, heiße Nächte und Hitzewellen häufiger geworden sind (siehe Tabelle SPM.2). {3.8}
- Beobachtungen belegen eine zunehmende Aktivität starker tropischer Wirbelstürme im Nordatlantik seit ungefähr 1970, verbunden mit einem Anstieg der tropischen Meeresoberflächentemperaturen. Eine zunehmende Aktivität starker tropischer Wirbelstürme in einigen anderen Regionen, wo größere Bedenken bezüglich der Datenqualität bestehen, wird ebenfalls vermutet. Multidekadische Schwankungen und die Qualität der Aufzeichnungen von tropischen Wirbelstürmen vor den routinemäßigen Satellitenbeobachtungen ungefähr im Jahr 1970 erschweren die Erkennung von langfristigen Trends in der Aktivität tropischer Wirbelstürme. Es gibt keinen klaren Trend in der Anzahl tropischer Wirbelstürme pro Jahr. {3.8}
- Im TAR wurde von einer Abnahme des Temperaturtagesgangs berichtet, aber die vorhandenen Daten reichten damals nur von 1950 bis 1993. Auf den neuesten Stand gebrachte Beobachtungen zeigen, dass sich der Temperaturtagesgang von 1979 bis 2004 nicht verändert hat, da die Temperaturen sowohl während der Nacht als auch am Tag ungefähr gleich stark gestiegen sind. Die Trends variieren stark von einer Region zur anderen. {3.2}
- Die Ausdehnung des antarktischen Meereises zeigt weiterhin Schwankungen von Jahr zu Jahr sowie örtlich begrenzte Veränderungen, aber keine statistisch signifikanten mittlere Trends. Dies steht im Einklang mit den über die Region gemittelten atmosphärischen Temperaturen, die keinen Anstieg zeigen. {3.2, 4.4}
- Die Indizien für einen Trend in der thermohalinen Zirkulation des globalen Ozeans oder bei kleinskaligen Phänomenen wie Tornados, Hagel, Blitz oder Staubstürmen, sind ungenügend. {3.8, 5.3}

Eine paläoklimatische Perspektive

Paläoklimatische Studien verwenden Veränderungen in klimatisch sensitiven Indikatoren, um daraus Änderungen im vergangenen Klima auf der Zeitskala im Bereich von Dekaden bis zu Millionen von Jahren abzuleiten. Solche Proxy-Daten (z.B. die Breite von Baumringen) können sowohl durch die lokale Temperatur als auch durch andere Faktoren wie Niederschlag beeinflusst werden und sind oft eher für eine bestimmte Jahreszeit repräsentativ als für ganze Jahre. Studien seit dem TAR haben die Sicherheit durch zusätzliche Daten, die ein übereinstimmendes Verhalten von mehreren Indikatoren in verschiedenen Gegenden der Erde zeigen, erhöht. Allerdings steigen im Allgemeinen die Unsicherheiten für weiter zurückliegende Zeiten an, da die räumliche Abdeckung immer begrenzter wird.

Bei einigen Klimaaspekten wurden keine Veränderungen beobachtet. {3.2, 3.8, 4.4., 5.3}

Paläoklimatische Informationen stützen die Interpretation, dass die Wärme des letzten halben Jahrhunderts für mindestens die letzten 1300 Jahre ungewöhnlich ist. Das letzte Mal, als die Polargebiete für längere Zeit signifikant wärmer waren als heute (vor etwa 125'000 Jahren), führten die Rückgänge der polaren Eismassen zu einem Meeresspiegelanstieg von 4 bis 6 Metern. {6.4, 6.6}

- Die mittleren Temperaturen in der Nordhemisphäre waren in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts *sehr wahrscheinlich* höher als während jedes anderen 50-Jahr-Abschnitts in den letzten 500 Jahren und *wahrscheinlich* die höchsten in zumindest den letzten 1300 Jahren. Einige neue Studien lassen auf eine größere Variabilität der nordhemisphärischen Temperaturen schließen als im TAR erwähnt und deuten insbesondere auf das Auftreten kühlerer Perioden im 12. bis 14., 17. und 19. Jahrhundert hin. Wärmere Perioden vor dem 20. Jahrhundert liegen innerhalb des im TAR aufgeführten Unsicherheitsbereichs. {6.6}
- Der mittlere globale Meeresspiegel war während der letzten Zwischeneiszeit (vor etwa 125'000 Jahren) *wahrscheinlich* 4 bis 6 Meter höher als im 20. Jahrhundert, hauptsächlich aufgrund des Rückzugs des Polareises. Eisbohrkerndaten legen nahe, dass die durchschnittlichen polaren Temperaturen zu dieser Zeit aufgrund von Abweichungen in der Erdumlaufbahn um 3 bis 5 °C höher lagen als heute. Der grönländische Eisschild und andere arktische Eisfelder trugen *wahrscheinlich* nicht mehr als 4 Meter zum beobachteten Meeresspiegelanstieg bei. Die Antarktis könnte ebenfalls zum Anstieg beigetragen haben. {6.4}

Verständnis und Zuordnung der Klimaänderung

Dieser Sachstandsbericht berücksichtigt, basierend auf Studien seit dem TAR, längere und verbesserte Messreihen, einen erweiterten Umfang von Beobachtungen und Verbesserungen in der Simulation vieler Aspekte des Klimas und dessen Variabilität. Er berücksichtigt auch die Resultate von neuen Zuordnungsstudien, die ausgewertet haben, ob beobachtete Änderungen mit der erwarteten Reaktion auf äußere Antriebe quantitativ übereinstimmen und mit alternativen physikalisch plausiblen Erklärungen unvereinbar sind.

Der größte Teil des beobachteten Anstiegs der mittleren globalen Temperatur seit Mitte des 20. Jahrhunderts ist *sehr wahrscheinlich* durch den beobachteten Anstieg der anthropogenen Treibhausgaskonzentrationen verursacht.¹² Dies ist ein Fortschritt gegenüber der Schlussfolgerung des TAR, wonach

„der größte Teil der beobachteten Erwärmung in den letzten 50 Jahren *wahrscheinlich* durch die Zunahme der Treibhausgaskonzentrationen verursacht wurde“. Erkennbare menschliche Einflüsse weiten sich nun auf andere Aspekte des Klimas aus, einschließlich die Erwärmung der Ozeane, mittlere kontinentale Temperaturen, Temperaturextreme und Windmuster (siehe Abbildung SPM.4 und Tabelle SPM.2). {9.4, 9.5}

- Es ist *wahrscheinlich*, dass der Anstieg der Treibhausgaskonzentrationen allein eine stärkere Erwärmung hervorgerufen hätte als die beobachtete, da vulkanische und anthropogene Aerosole einen Teil der Erwärmung, die sonst stattgefunden hätte, aufgehoben haben. {2.9, 7.5, 9.4}
- Die beobachtete weit verbreitete Erwärmung der Atmosphäre und des Ozeans zusammen mit dem Eismassenverlust unterstützen die Schlussfolgerung, dass es *äußerst unwahrscheinlich* ist, dass die Klimaänderung der letzten 50 Jahre ohne äußeren Antrieb erklärt werden kann, und dass sie *sehr wahrscheinlich* nicht allein auf bekannte natürliche Ursachen zurückgeführt werden kann. {4.8, 5.2, 9.4, 9.5, 9.7}
- Eine Erwärmung des Klimasystems wurde bei den Änderungen der bodennahen und atmosphärischen Temperaturen, bei den Temperaturen der obersten paar hundert Meter des Ozeans und bei den Beiträgen zum Meeresspiegelanstieg festgestellt. Bei allen diesen Änderungen haben Zuordnungsstudien die anthropogenen Beiträge ermittelt. Das beobachtete Muster von troposphärischer Erwärmung und stratosphärischer Abkühlung ist *sehr wahrscheinlich* durch die kombinierten Einflüsse der Treibhausgaszunahme und des stratosphärischen Ozonabbaus verursacht. {3.2, 3.4, 9.4, 9.5}
- *Wahrscheinlich* hat im Durchschnitt über jedem Kontinent mit Ausnahme der Antarktis in den letzten 50 Jahren eine signifikante anthropogene Erwärmung stattgefunden (siehe Abbildung SPM.4). Die beobachteten Muster der Erwärmung, einschließlich der größeren Erwärmung über dem Land als über dem Ozean sowie deren Änderungen im Verlauf der Zeit, können nur durch Modelle nachgebildet werden, die den anthropogenen Antrieb miteinbeziehen.

¹² Die Berücksichtigung der verbleibenden Unsicherheiten basiert auf den aktuellen Methoden.

- Der anthropogene Antrieb hat *wahrscheinlich* zu den Änderungen der Windmuster beigetragen,¹³ welche die außertropischen Zugbahnen der Stürme und Temperaturmuster in beiden Hemisphären beeinflussen. Allerdings sind die beobachteten Änderungen in der nordhemisphärischen Zirkulation stärker als die berechnete Reaktion auf die Änderungen des Antriebs im 20. Jahrhundert. {3.5, 3.6, 9.5, 10.3}
- Die Temperaturen der extremsten heißen Nächte, kalten Nächte und kalten Tage haben *wahrscheinlich* aufgrund des anthropogenen Antriebs zugenommen. Es ist *eher wahrscheinlich als nicht*, dass der anthropogene Antrieb das Risiko von Hitzewellen erhöht hat (siehe Tabelle SPM.2). {9.4}

Die Analyse von Klimamodellen kombiniert mit Randbedingungen aus den Beobachtungen ermöglicht zum ersten Mal die Angabe einer geschätzten *wahrscheinlichen* Bandbreite der Klimasensitivität und verschafft ein höheres Vertrauen in das Verständnis der Reaktion des Klimasystems auf den Strahlungsantrieb. {6.6, 8.6, 9.6. Kasten 10.2}

- Die Gleichgewichts-Klimasensitivität ist ein Maß für die Reaktion des Klimasystems auf einen anhaltenden Strahlungsantrieb. Sie ist keine Projektion, sondern ist definiert als die mittlere globale Erwärmung an der Erdoberfläche aufgrund einer Verdoppelung der Kohlendioxidkonzentration. Sie liegt *wahrscheinlich* in der Bandbreite von 2 bis 4,5 °C, mit einem besten Schätzwert von etwa 3 °C, und es ist *sehr unwahrscheinlich*, dass sie kleiner als 1,5 °C ist. Wesentlich höhere Werte als 4,5 °C können nicht ausgeschlossen werden, aber die Übereinstimmung von Modellen mit den Beobachtungen ist für diese Werte nicht so gut. Änderungen des Wasserdampfes repräsentieren die stärkste Rückkopplung bezüglich der Klimasensitivität und werden nun besser verstanden als im TAR. Rückkopplungen durch Wolken bleiben die größte Unsicherheitsquelle. {8.6, 9.6, Kasten 10.2}
- Es ist *sehr unwahrscheinlich*, daß die Klimaänderungen der mindestens sieben letzten Jahrhunderte vor 1950

allein auf Schwankungen innerhalb des Klimasystems zurückzuführen sind. Ein signifikanter Teil der rekonstruierten nordhemisphärischen interdekadischen Temperaturschwankungen in diesen Jahrhunderten kann *sehr wahrscheinlich* Vulkaneruptionen und Änderungen der Sonnenstrahlung zugeordnet werden. Der anthropogene Antrieb hat *wahrscheinlich* zur Erwärmung im frühen 20. Jahrhundert beigetragen, die in diesen Aufzeichnungen ersichtlich ist. {2.7, 2.8, 6.6, 9.3}

Projektionen zukünftiger Änderungen des Klimas

Ein wichtiger Fortschritt dieses Sachstandsberichts gegenüber dem TAR stellt die große Zahl von Simulationen von einer breiteren Auswahl von Modellen dar. Sie bieten zusammen mit zusätzlichen Informationen von Beobachtungen eine quantitative Basis für die Abschätzung der Wahrscheinlichkeit von vielen Aspekten der zukünftigen Klimaänderung. Modellrechnungen decken eine Bandbreite von Szenarien der möglichen Zukunft einschließlich idealisierter Emissions- und Konzentrationsannahmen ab. Diese beinhalten die illustrativen SRES¹⁴-Musterszenarien für den Zeitraum 2000–2100 sowie Modellexperimente, bei welchen nach den Jahren 2000 bzw. 2100 die Treibhausgas- und Aerosolkonzentrationen konstant gehalten werden.

Für die nächsten zwei Jahrzehnte wird für eine Reihe von SRES-Szenarien eine Erwärmung von 0,2 °C pro Jahrzehnt projiziert. Selbst wenn die Konzentrationen aller Treibhausgase und Aerosole auf dem Niveau des Jahres 2000 konstant gehalten würden, wäre eine weitere Erwärmung von 0,1 °C pro Jahrzehnt zu erwarten. {10.3, 10.7}

- Seit dem ersten IPCC-Bericht von 1990 deuteten die geschätzten Projektionen für 1990–2005 auf einen mittleren globalen Temperaturanstieg von etwa 0,15 bis 0,3 °C pro Jahrzehnt hin. Dies kann nun mit den beobachteten Werten von ca. 0,2 °C pro Jahrzehnt verglichen werden. Dadurch wird das Vertrauen in kurzfristige Projektionen gestärkt. {1.2, 3.2}

¹³ Im Speziellen den „Southern“ und „Northern Annular Mode“ und damit verbundene Änderungen der Nordatlantischen Oszillation. {3.6, 9.5, Box TS.2}

¹⁴ SRES bezieht sich auf den IPCC-Sonderbericht zu Emissionsszenarien (2000). Die SRES-Szenarienfamilien und illustrativen Fallbeispiele, welche keine zusätzlichen Klimainitiativen beinhalten, sind in einem Kasten am Ende dieser Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger zusammengefasst. Die ungefähren CO₂-Äquivalent-Konzentrationen, die dem auf der Basis der anthropogenen Treibhausgase und Aerosole im Jahr 2100 (siehe S. 823 im TAR) berechneten Strahlungsantrieb für die illustrativen SRES-Musterszenarien B1, A1T, B2, A1B, A2 und A1FI entsprechen, betragen 600, 700, 800, 850, 1250 bzw. 1550 ppm. Die Szenarien B1, A1B und A2 standen im Mittelpunkt von Modellvergleichsstudien, wobei viele der entsprechenden Resultate in diesem Bericht beurteilt werden.

- Modellexperimente zeigen, dass in den nächsten zwei Jahrzehnten sogar dann ein weiterer Erwärmungstrend mit einer Geschwindigkeit von etwa 0,1 °C pro Jahrzehnt zu beobachten wäre, wenn alle Strahlungsantriebs-Faktoren auf dem Niveau des Jahres 2000 konstant gehalten würden. Dies ist hauptsächlich auf die langsame Reaktion der Ozeane zurückzuführen. Liegen die Emissionen innerhalb der Bandbreite der SRES-Szenarien, so wäre eine etwa doppelt so starke Erwärmung zu erwarten (0,2 °C pro Jahrzehnt). Die besten Schätzwerte der Modellprojektionen weisen darauf hin, dass die über ein Jahrzehnt gemittelte Erwärmung bis 2030 auf allen bewohnten Kontinenten nicht von der Wahl des SRES-Szenarios abhängig ist. Sie wird *sehr wahrscheinlich* mindestens doppelt so groß wie die von den Modellen geschätzte natürliche Schwankung während des 20. Jahrhunderts sein. {9.4, 10.3, 10.5, 11.2–11.7, Abbildung TS-29}
- Fortschritte in der Modellierung der Klimaänderung ermöglichen nun beste Schätzungen und die Angabe von *wahrscheinlichen* Unsicherheitsbereichen für die projizierte Erwärmung für verschiedene Emissionsszenarien. Die Ergebnisse für verschiedene Emissionsszenarien sind in diesem Bericht explizit dargestellt, um einen Verlust dieser politisch relevanten Information zu verhindern. Die projizierten global gemittelten Temperaturzunahmen an der Erdoberfläche für das Ende des 21. Jahrhunderts (2090–2099) verglichen mit 1980–1999 sind in Tabelle SPM.3 dargestellt. Sie veranschaulichen die Unterschiede zwischen niedrigeren und höheren SRES-Emissionsszenarien und die mit diesen Szenarien verbundenen Unsicherheiten der projizierten Erwärmung. {10.5}
- In diesem Bericht sind beste Schätzungen und *wahrscheinliche* Bandbreiten für die mittlere globale Erwärmung an der Erdoberfläche für sechs SRES-Muster-Emissionsszenarien aufgeführt und in Tabelle SPM.3 dargestellt. Beispielsweise liegt die beste Schätzung für das niedrige Szenario (B1) bei 1,8 °C (*wahrscheinliche* Bandbreite von 1,1 °C bis 2,9 °C) und die beste Schätzung für das hohe Szenario (A1FI) beträgt 4,0 °C (*wahrscheinliche* Bandbreite von 2,4 °C bis 6,4 °C). Obwohl diese Projektionen weitgehend mit der im TAR angegebenen Spannweite (1,4 °C bis 5,8 °C) übereinstimmen, sind sie nicht direkt

Andauernd gleich hohe oder höhere Treibhausgasemissionen als heute würden eine weitere Erwärmung verursachen und im 21. Jahrhundert viele Änderungen im globalen Klimasystem bewirken, die *sehr wahrscheinlich* größer wären als die im 20. Jahrhundert beobachteten. {10.3}

Tabelle SPM.3. Projizierte mittlere globale Erwärmung an der Erdoberfläche und Meeresspiegelanstieg am Ende des 21. Jahrhunderts {10.5, 10.6, Tabelle 10.7}

Fall	Temperaturänderung (°C; 2090–2099 verglichen mit 1980–1999) ^a		Meeresspiegelanstieg (m; 2090–2099 verglichen mit 1980–1999)
	Beste Schätzung	Wahrscheinliche Bandbreite	Modellbasierte Bandbreite ohne zukünftige rapide Änderungen des Eisflusses
Konstante Jahr-2000-Konzentrationen ^b	0.6	0.3 – 0.9	NA
B1-Szenario	1.8	1.1 – 2.9	0.18 – 0.38
A1T-Szenario	2.4	1.4 – 3.8	0.20 – 0.45
B2-Szenario	2.4	1.4 – 3.8	0.20 – 0.43
A1B-Szenario	2.8	1.7 – 4.4	0.21 – 0.48
A2-Szenario	3.4	2.0 – 5.4	0.23 – 0.51
A1FI-Szenario	4.0	2.4 – 6.4	0.26 – 0.59

Bemerkungen:

^a Diese Schätzungen wurden basierend auf einer Hierarchie von Modellen vorgenommen, welche ein einfaches Klimamodell, mehrere Modelle mittlerer Komplexität (EMICs) und eine große Anzahl von Globalen Atmosphäre-Ozean-Klimamodellen (AOGCMs) umfassen.

^b Die Zahlen für den Fall konstanter Jahr-2000-Konzentrationen wurden nur aus AOGCMs abgeleitet.

MULTIMODELL-MITTEL UND GESCHÄTZTE BANDBREITEN FÜR DIE ERWÄRMUNG AN DER ERDOBERFLÄCHE

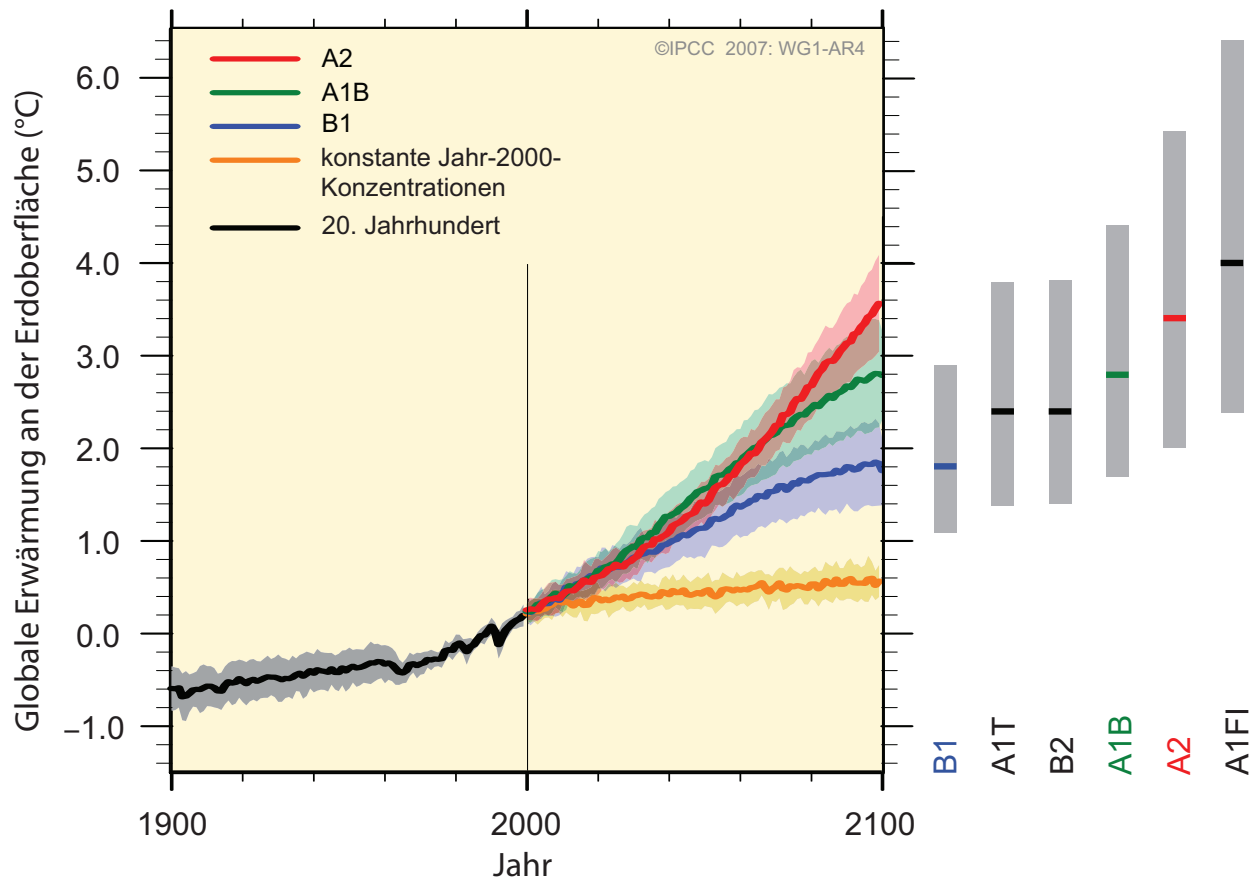


Abbildung SPM.5. Die durchgezogenen Linien sind globale Multimodell-Mittel der Erwärmung an der Erdoberfläche (relativ zu 1980–99) für die Szenarien A2, A1B und B1, dargestellt als Verlängerungen der Simulationen für das 20. Jahrhundert. Die Schattierung kennzeichnet die Bandbreite von plus/minus einer Standardabweichung der einzelnen Modell-Jahresmittel. Die orange Linie stellt das Resultat des Experiments dar, bei dem die Konzentrationen auf Jahr-2000-Werten konstant gehalten wurden. Die grauen Balken auf der rechten Seite zeigen die beste Schätzung (durchgezogene Linie innerhalb des Balkens) und die abgeschätzte wahrscheinliche Bandbreite für die sechs SRES-Musterszenarien. Die Herleitung der besten Schätzungen und wahrscheinlichen Bandbreiten in den grauen Balken beinhaltet sowohl die AOGCMs im linken Teil der Abbildung als auch die Resultate einer Hierarchie von unabhängigen Modellen sowie beobachtungsgestützte Randbedingungen. {Abbildungen 10.4 und 10.29}

vergleichbar (siehe Abbildung SPM.5). Der AR4 ist insofern weiter fortgeschritten, als er für jedes der Musterszenarien beste Schätzungen und geschätzte Wahrscheinlichkeitsbereiche zur Verfügung stellt. Die neue Bemessung der *wahrscheinlichen* Bandbreiten stützt sich nun auf eine größere Anzahl von zunehmend komplexeren und realistischeren Klimamodellen sowie auf neue Informationen bezüglich der Rückkopplungseigenschaften des Kohlenstoffkreislaufs und der durch Beobachtungen bestimmten Randbedingungen für die Reaktion des Klimas. {10.5}

- Eine Erwärmung führt tendenziell zu einer Verringerung der Aufnahme atmosphärischen Kohlendioxids durch Land und Ozeane, wodurch der Anteil der in der Atmosphäre verbleibenden anthropogenen Emissionen

erhöht wird. Für das A2-Szenario erhöht die Klima-Kohlenstoffkreislauf-Rückkopplung beispielsweise die entsprechende mittlere globale Erwärmung im Jahr 2100 um mehr als 1 °C. Die geschätzten oberen Bereiche der Temperaturprojektionen sind hauptsächlich deshalb größer als im TAR (siehe Tabelle SPM.3), weil der größere Teil der nun zur Verfügung stehenden Modelle eine stärkere Klima-Kohlenstoffkreislauf-Rückkopplung nahelegt. {7.3, 10.5}

- Tabelle SPM.3 zeigt die Modell-basierten Projektionen des mittleren globalen Meeresspiegelanstiegs am Ende des 21. Jahrhunderts (2090–2099). Für jedes Szenario liegt der Mittelpunkt der Bandbreiten in Tabelle SPM.3 innerhalb von maximal 10% Abweichung vom Modelldurchschnitt für 2090–2099 im TAR. Die

Bandbreiten sind hauptsächlich aufgrund verbesserter Informationen bezüglich einiger Unsicherheiten bei den projizierten Beiträgen enger als im TAR.¹⁵ {10.6}

- Die zur Zeit verwendeten Modelle beinhalten weder Unsicherheiten in den Klima-Kohlenstoffkreislauf-Rückkopplungen noch die vollen Auswirkungen von Änderungen des Eisschildflusses, da eine entsprechende Grundlage in der publizierten Literatur fehlt. Die Projektionen enthalten zwar einen Beitrag aufgrund des verstärkten Eisflusses von Grönland und der Antarktis mit der von 1993–2003 beobachteten Geschwindigkeit, aber diese Fließgeschwindigkeiten könnten in Zukunft zu- oder abnehmen. Würde dieser Beitrag beispielsweise linear mit der Änderung der mittleren globalen Temperatur anwachsen, würde der obere Bereich des Meeresspiegelanstiegs für die in Tabelle SPM.3 aufgeführten SRES-Szenarien um 0,1 bis 0,2 m zunehmen. Größere Werte können nicht ausgeschlossen werden, aber das Verständnis dieser Effekte ist zu begrenzt, um die Wahrscheinlichkeit beurteilen zu können oder eine beste Schätzung oder eine obere Grenze für den Meeresspiegelanstieg angeben zu können. {10.6}
- Steigende atmosphärische Kohlendioxidkonzentrationen führen zu einer zunehmenden Versauerung der Ozeane. Die auf den SRES-Szenarien basierenden Projektionen zeigen über das 21. Jahrhundert Abnahmen des mittleren globalen Meeresoberflächen-pHs¹⁶ von 0,14 bis 0,35 Einheiten, zusätzlich zur bisherigen Abnahme von 0,1 Einheiten seit der vorindustriellen Zeit. {5.4, Kasten 7.3, 10.4}

Das Vertrauen in projizierte Erwärmungsmuster und andere regionale Besonderheiten, einschließlich Veränderungen der Windmuster, Niederschläge und einige Aspekte von Extremereignissen und Eis, ist nun höher. {8.2, 8.3, 8.4, 8.5, 9.4, 9.5, 10.3, 11.1}

MODELLPROJEKTIONEN DER ERDOBERFLÄCHENTEMPERATUR

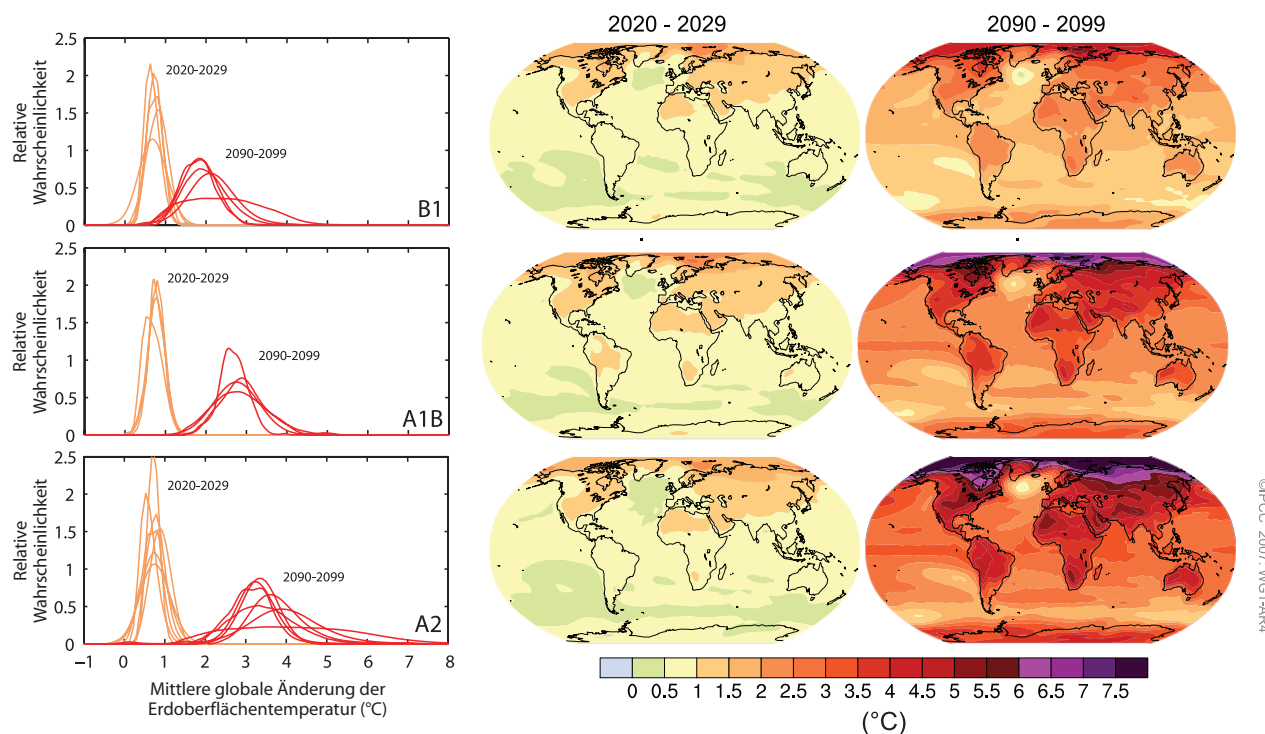


Abbildung SPM.6. Projizierte Änderungen der Erdoberflächentemperatur für das frühe und späte 21. Jahrhundert im Vergleich zum Zeitraum 1980–1999. Die mittleren und rechten Grafiken zeigen die AOGCM-Multimodell-Mittel-Projektionen für die B1- (oben), A1B- (Mitte) und A2- (unten) -SRES-Szenarien, gemittelt über die Jahrzehnte 2020–2029 (Mitte) und 2090–2099 (rechts). Die linken Grafiken zeigen die entsprechenden Unsicherheiten als relative Wahrscheinlichkeiten der geschätzten mittleren globalen Erwärmung aus mehreren unterschiedlichen AOGCM- und EMIC-Studien für die gleichen Zeiträume. Einige Studien bieten nur Resultate für einen Teil der SRES-Szenarien oder für verschiedene Modellversionen. Deshalb ist die Anzahl der in den linken Grafiken gezeigten Kurven einzig wegen der unterschiedlichen Verfügbarkeit von Resultaten unterschiedlich. {Abbildungen 10.8 und 10.28}

¹⁵ Die TAR-Projektionen wurden für 2100 angegeben, während die Projektionen in diesem Bericht für 2090–2099 gelten. Der TAR hätte ähnliche Bereiche wie diejenigen in Tabelle SPM.3 erhalten, wenn er die Unsicherheiten in gleicher Weise behandelt hätte.

¹⁶ Abnahmen des pH entsprechen Zunahmen des Säuregehaltes einer Lösung. Siehe Glossar für weitere Details.

PROJIZIERTE ÄNDERUNGSMUSTER DER NIEDERSCHLÄGE

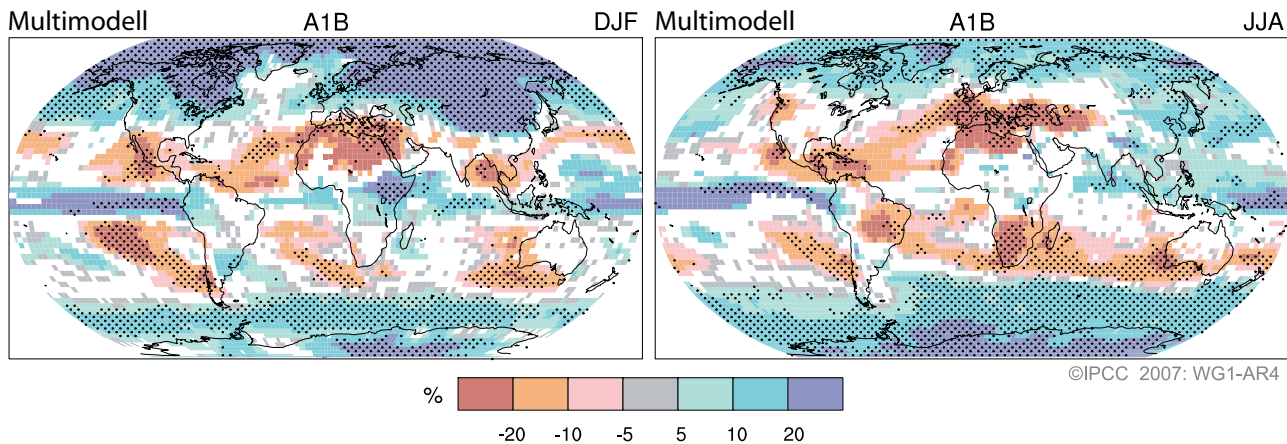


Abbildung SPM.7. Relative Änderungen der Niederschläge (in Prozent) für den Zeitraum 2090–2099 im Vergleich zu 1980–1999. Die Werte sind Multimodell-Mittel, basierend auf dem SRES-A1B-Szenario für Dezember bis Februar (links) und Juni bis August (rechts). Flächen, für welche weniger als 66% der Modelle bezüglich des Vorzeichens der Änderung übereinstimmen, sind weiß; solche, für welche mehr als 90% der Modelle bezüglich des Vorzeichens der Änderungen übereinstimmen, sind punktiert. (Abbildung 10.9)

- Die projizierte Erwärmung im 21. Jahrhundert zeigt szenariounabhängige geographische Muster, welche den über die letzten paar Jahrzehnte beobachteten ähnlich sind. Die größte Erwärmung wird über dem Land und in den meisten hohen nördlichen Breiten erwartet, die kleinste über dem südlichen Ozean und über Teilen des Nordatlantischen Ozeans (siehe Abbildung SPM.6). {10.3}
- Es wird eine Abnahme der Schneebedeckung projiziert. Die Projektionen zeigen weit verbreitete Zunahmen der Auftautiefe in den meisten Permafrostregionen. {10.3, 10.6}
- Es wird für alle SRES-Szenarien eine Schrumpfung des Meereises sowohl in der Arktis als auch der Antarktis projiziert. In einigen Projektionen verschwindet in der Arktis im letzten Teil des 21. Jahrhunderts das Meereis im Spätsommer fast vollständig. {10.3}
- Heiße Extreme, Hitzewellen und Starkniederschlags-Ereignisse werden *sehr wahrscheinlich* weiterhin zunehmen. {10.3}
- Es ist, basierend auf einer Auswahl von Modellen, *wahrscheinlich*, dass zukünftige tropische Wirbelstürme (Taifune und Hurrikane) in Verbindung mit dem laufenden Anstieg der tropischen Meeresoberflächentemperaturen intensiver werden, mit höheren Spitzenwindgeschwindigkeiten und mehr Starkniederschlägen. Das Vertrauen in Projektionen einer globalen Abnahme der Anzahl tropischer Wirbelstürme ist weniger gut. Der sichtbare Anstieg des Anteils an sehr intensiven Stürmen in einigen Regionen seit 1970 ist viel größer als von den aktuellen Modellen für diesen Zeitraum berechnet. {9.5, 10.3, 3.8}
- Es wird eine Verschiebung der außertropischen Zugbahnen der Stürme polwärts mit entsprechenden Änderungen der Wind-, Niederschlags- und Temperaturmuster projiziert. Dies bedeutet eine Fortführung des groben Musters der beobachteten Trends über das letzte halbe Jahrhundert. {3.6, 10.3}
- Seit dem TAR hat sich das Verständnis der projizierten Niederschlagsmuster verbessert. Die Niederschlagsmengen nehmen in höheren Breiten *sehr wahrscheinlich* zu, während Abnahmen über den meisten subtropischen Landregionen (um bis zu 20% im A1B-Szenario bis 2100, siehe Abbildung SPM.7) *wahrscheinlich* sind. Dies bedeutet eine Fortführung der beobachteten Muster in den aktuellen Trends. {3.3, 8.3, 9.5, 10.3, 11.2 bis 11.9}
- Basierend auf aktuellen Modellrechnungen ist es *sehr wahrscheinlich*, dass sich die atlantische meridionale Umwälzungsströmung (MOC) während des 21. Jahrhunderts abschwächen wird. Im Mittel von Multimodellrechnungen beträgt die Abnahme für das SRES-Emissionsszenario A1B 25% (Bandbreite von

Null bis 50%). Die Projektionen zeigen trotz dieser Änderungen einen Temperaturanstieg in der Atlantik-Region, da die Erwärmung aufgrund des projizierten Anstiegs der Treibhausgase viel größer ist. Es ist *sehr unwahrscheinlich*, dass die MOC im 21. Jahrhundert eine große abrupte Änderung erfahren wird. Langfristige Änderungen der MOC können nicht vertrauenswürdig beurteilt werden. {10.3, 10.7}

Die anthropogene Erwärmung und der Meeresspiegelanstieg würden aufgrund der Zeitskalen, die mit Klimaprozessen und Rückkopplungen verbunden sind, über Jahrhunderte andauern, selbst wenn die Treibhausgaskonzentrationen stabilisiert würden. {10.4, 10.5, 10.7}

- Es wird erwartet, dass die Kopplung von Klima und Kohlenstoffkreislauf der Atmosphäre Kohlendioxid hinzufügt wenn sich das Klimasystem erwärmt, aber die Stärke dieser Rückkopplung ist unsicher. Dies erhöht die Unsicherheit in Bezug auf den für die Erreichung eines bestimmten Stabilisationsniveaus der Kohlendioxidkonzentration nötigen Verlauf der Kohlendioxid-Emissionen. Modellstudien, die auf dem aktuellen Verständnis der Klima-Kohlenstoffkreislauf-Rückkopplung basieren, legen nahe, dass zur Stabilisierung auf 450 ppm Kohlendioxid eine Reduktion der über das 21. Jahrhundert kumulierten Emissionen von einem Durchschnitt von ungefähr 670 [630 bis 710] GtC (2460 [2310 to 2600] GtCO₂) auf ungefähr 490 [375 bis 600] GtC (1800 [1370 to 2200] GtCO₂) nötig sein könnte. Ebenso könnte diese Rückkopplung für eine Stabilisierung auf 1000 ppm eine Reduktion der kumulativen Emissionen von einem Modell-Durchschnitt von ungefähr 1415 [1340 bis 1490] GtC (5190 [4910 to 5460] GtCO₂) auf ungefähr 1100 [980 bis 1250] GtC (4030 [3590 to 4580] GtCO₂) nötig machen. {7.3, 10.4}
- Falls der Strahlungsantrieb im Jahr 2100 auf B1- oder A1B-Niveau¹⁴ stabilisiert werden würde, wäre immer noch ein weiterer Anstieg der mittleren globalen Temperatur um etwa 0,5 °C zu erwarten, größtenteils bis ins Jahr 2200. {10.7}
- Falls der Strahlungsantrieb im Jahr 2100 auf A1B-Niveau¹⁴ stabilisiert werden würde, würde allein die thermische Ausdehnung zu einem Meeresspiegelanstieg von 0,3 bis 0,8 m bis 2300 (im Vergleich zu 1980–1999) führen. Die thermische Ausdehnung würde aufgrund der für den Wärmetransport in die Tiefen des Ozeans benötigten Zeit über viele Jahrhunderte andauern. {10.7}
- Es wird projiziert, dass die Schrumpfung des grönländischen Eisschildes nach 2100 fortgesetzt zum Meeresspiegelanstieg beiträgt. Aktuelle Modelle legen nahe, dass die Eismassenverluste mit der Temperatur schneller ansteigen als die Gewinne aufgrund von Niederschlägen und dass die Oberflächen-Massenbilanz bei einer mittleren globalen Erwärmung (im Vergleich zu vorindustriellen Werten) von mehr als 1.9 bis 4.6 °C negativ wird. Falls eine negative Oberflächen-Massenbilanz über Jahrtausende aufrechterhalten werden würde, würde dies zu einer praktisch vollständigen Elimination des grönländischen Eisschildes und zu einem daraus folgenden Beitrag von etwa 7 m zum Meeresspiegelanstieg führen. Die entsprechenden zukünftigen Temperaturen in Grönland sind vergleichbar mit den für die letzte Zwischeneiszeit vor 125'000 Jahren geschätzten Temperaturen, für welche paläoklimatische Informationen eine Reduktion der Ausdehnung der polaren Landeismassen und einen Meeresspiegelanstieg von 4 bis 6 m nahelegen. {6.4, 10.7}
- Mit dem Eisfluss verbundene dynamische Prozesse, die in den aktuellen Modellen nicht berücksichtigt sind, aber durch neueste Beobachtungen nahegelegt werden, könnten die Anfälligkeit der Eisschilder gegenüber Erwärmung und damit den Meeresspiegelanstieg erhöhen. Das Verständnis dieser Prozesse ist beschränkt, und es gibt keinen Konsens über deren Ausmaß. {4.6, 10.7}
- Aktuelle globale Modellstudien projizieren, dass der antarktische Eisschild zu kalt für ein verbreitetes Schmelzen an der Oberfläche bleibt und dass ein Massenzuwachs aufgrund zunehmender Schneefälle zu erwarten ist. Allerdings könnte ein Netto-Eismassenverlust auftreten, wenn der dynamische Eisabfluss die Massenbilanz des Eisschildes dominiert. {10.7}
- Sowohl vergangene als auch zukünftige anthropogene Kohlendioxidemissionen werden aufgrund der für eine Entfernung dieses Gases aus der Atmosphäre benötigten Zeitskala für länger als ein Jahrtausend fortgesetzt zur Erwärmung und zum Meeresspiegelanstieg beitragen. {7.3, 10.3}

DIE EMISSIONS-SZENARIEN DES IPCC-SONDERBERICHTES ÜBER EMISSIONS-SZENARIEN (SRES)¹⁷

A1. Die A1-Modellgeschichte bzw. -Szenarien-Familie beschreibt eine zukünftige Welt mit sehr raschem Wirtschaftswachstum, einer Mitte des 21. Jahrhunderts kulminierenden und danach rückläufigen Weltbevölkerung, und rascher Einführung neuer und effizienterer Technologien. Wichtige grundlegende Themen sind Annäherung von Regionen, Entwicklung von Handlungskompetenz sowie zunehmende kulturelle und soziale Interaktion bei gleichzeitiger substantieller Verringerung regionaler Unterschiede der Pro-Kopf-Einkommen. Die A1-Szenarien-Familie teilt sich in drei Gruppen auf, die unterschiedliche Ausrichtungen technologischer Änderungen im Energiesystem beschreiben. Die drei A1-Gruppen unterscheiden sich in ihrer technologischen Hauptstossrichtung: fossil-intensiv (A1FI), nichtfossile Energiequellen (A1T) oder eine ausgewogene Nutzung aller Quellen (A1B) (wobei ausgewogene Nutzung definiert ist als eine nicht allzu große Abhängigkeit von einer bestimmten Energiequelle und durch die Annahme eines ähnlichen Verbesserungspotentials für alle Energieversorgungs- und -verbrauchstechnologien).

A2. Die A2-Modellgeschichte bzw. -Szenarien-Familie beschreibt eine sehr heterogene Welt. Das Grundthema ist Autarkie und Bewahrung lokaler Identitäten. Regionale Fruchtbarkeitsmuster konvergieren nur sehr langsam, was eine stetig zunehmende Bevölkerung zur Folge hat. Die wirtschaftliche Entwicklung ist vorwiegend regional orientiert und das Pro-Kopf-Wirtschaftswachstum und technologische Veränderungen sind bruchstückhafter und langsamer als in anderen Modellgeschichten.

B1. Die B1- Modellgeschichte bzw. -Szenarien-Familie beschreibt eine sich näher kommende Welt, mit der gleichen, Mitte des 21. Jahrhunderts kulminierenden und danach rückläufigen Weltbevölkerung wie in der A1-Modellgeschichte, jedoch mit raschen Änderungen der wirtschaftlichen Strukturen in Richtung einer Dienstleistungs- und Informationswirtschaft, bei gleichzeitigem Rückgang des Materialverbrauchs und Einführung von sauberen und ressourcen-effizienten Technologien. Das Schwergewicht liegt auf globalen Lösungen für eine wirtschaftliche, soziale und umweltgerechte Nachhaltigkeit, einschließlich erhöhter sozialer Gerechtigkeit, aber ohne zusätzliche Klimainitiativen.

B2. Die B2-Modellgeschichte bzw. -Szenarien-Familie beschreibt eine Welt mit Schwerpunkt auf lokalen Lösungen für eine wirtschaftliche, soziale und umweltgerechte Nachhaltigkeit. Es ist eine Welt mit einer stetig, jedoch langsamer als in A2 ansteigenden Weltbevölkerung, wirtschaftlicher Entwicklung auf mittlerem Niveau und weniger raschem, dafür vielfältigerem technologischem Fortschritt als in den B1- und A1-Modellgeschichten. Obwohl das Szenario auch auf Umweltschutz und soziale Gerechtigkeit ausgerichtet ist, liegt der Schwerpunkt auf der lokalen und regionalen Ebene.

Für jede der sechs Szenarien-Gruppen A1B, A1FI, A1T, A2, B1 und B2 wurde ein illustratives Szenario gewählt. Alle sollten als gleich stichhaltig betrachtet werden.

Die SRES-Szenarien beinhalten keine zusätzlichen Klimainitiativen, d.h. es sind keine Szenarien berücksichtigt, die ausdrücklich eine Umsetzung des Rahmenübereinkommens der Vereinten Nationen über Klimaänderungen (UNFCCC) oder den Emissionszielsetzungen des Kyoto-Protokolls annehmen.

¹⁷ Emissionsszenarien wurden in diesem Bericht der IPCC-Arbeitsgruppe I nicht untersucht. Dieser Kasten mit der Zusammenfassung der SRES-Szenarien wurde vom TAR übernommen und wurde zu einem früheren Zeitpunkt vom Ausschuss Zeile für Zeile verabschiedet.