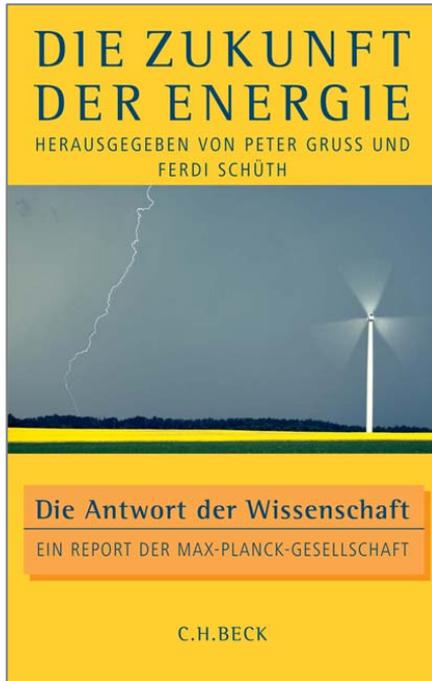


Unverkäufliche Leseprobe



Peter Gruss, Ferdi Schüth
Die Zukunft der Energie
Die Antwort der Wissenschaft

333 Seiten, Broschiert
ISBN: 978-3-406-57639-3

Energie und Klima: Klimaprojektionen für das 21. Jahrhundert

Von Jochem Marotzke und Erich Roeckner¹

Einleitung

Energieversorgung und Klimawandel sind untrennbar miteinander verknüpft. Die bei der Verbrennung fossiler Brennstoffe ausgestoßenen Treibhausgase haben die Zusammensetzung der Erdatmosphäre bereits fundamental verändert. Man muss Jahrtausende in die Erdgeschichte zurückgehen, um Konzentrationen des Treibhausgases Kohlendioxid (CO₂) zu finden, die mit den heutigen vergleichbar sind.² Die Menschheit verändert zurzeit die Zusammensetzung der Erdatmosphäre und das globale Klima mit einer Geschwindigkeit, die mindestens zehnmal höher ist als am Ende einer Eiszeit. Andererseits beeinflusst die Sorge über menschengemachte Klimaänderungen, die zu möglicherweise nicht beherrschbaren Anpassungsproblemen führen, in entscheidendem Maße die Debatte über eine zukunftssichere Energieversorgung. Im Rahmen der umfassenden Diskussion über die Zukunft der Energieversorgung in diesem Buch geben wir hier einen Überblick über die Klimaänderungen, die für das 21. Jahrhundert zu erwarten sind.

Globale Klimapolitik erfordert, wie jede globale Umweltpolitik, internationale Abkommen, um ihre Ziele zu erreichen. Durch das Kyoto-Protokoll soll die weltweite Emission von Treibhausgasen reduziert werden. Um die Politik bei der Begrenzung des künftigen Klimawandels zu unterstützen, erstellt der «Zwischenstaatliche Ausschuss zum Klimawandel» (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) regelmäßig Bewertungen der aktuellen Forschungsergebnisse. Dazu gehören Projektionen von möglichen zukünftigen Klimaentwicklungen mit Hilfe detaillierter Klimamodelle, die sich auf vorgegebene Szenarien zum Ausstoß von CO₂ und anderen Treibhausgasen stützen. Auch für den im Jahr 2007 erschienenen 4. Sachstandsbericht des IPCC wurden solche Klimaprojektionen berechnet und ihre Ergebnisse den Wissenschaftlern zur Auswertung zur Verfügung gestellt.

Der deutsche Beitrag zum 4. Sachstandsbericht des IPCC umfasste eine Serie von Modellrechnungen, die mit den Modellen des Max-Planck-Instituts für Meteorologie (MPI-M) am Deutschen Klimarechenzentrum (DKRZ) in Hamburg erstellt wurden. Diese extrem aufwändigen Rechnungen – insgesamt etwa 5000 simulierte Jahre – erforderten etwa 400 000 Prozessorstunden auf dem Höchstleistungsrechner für die Erdsystemforschung (HLRE) des DKRZ. Dies entspricht einem Viertel der Ressourcen eines Jahres. Die Rechnungen erfolgten mit Unterstützung der Arbeitsgruppe «Modelle und Daten» (M&D), einer nationalen Serviceeinrichtung, die das Weltdatenarchiv für die Klimaforschung (WDCC) verwaltet. Da die Ergebnisse der Simulationen von allgemeinem Interesse und potenziell für viele Forschergruppen von Bedeutung sind, wurden die Modelldaten (etwa 115 Terabyte) in der Klimadatenbank von M&D und DKRZ gespeichert und im Rahmen des WDCC über das Internet zur Verfügung gestellt.

Wir geben im Folgenden einen Überblick über die vom IPCC vorgestellten Szenarien, über die verschiedenen Modellkonfigurationen sowie über die wichtigsten Ergebnisse unserer Klimaprojektionen.

Der IPCC-Prozess

In den vergangenen Jahrzehnten wuchs in der internationalen Gemeinschaft der Klimaforscher die Sorge, dass menschliche Aktivitäten negative Einflüsse auf das Klima der Erde ausüben könnten. Bereits in einem frühen Stadium der Forschung waren die Wissenschaftler überzeugt, dass der menschliche Einfluss auf das Klima genauer analysiert werden müsse, um die wissenschaftlichen Grundlagen für die Beratung politischer Entscheidungsträger zu schaffen. Zu diesem Zweck wurde 1988 unter Federführung zweier UN-Organisationen, des UNEP (United Nations Environment Programme) und der WMO (World Meteorological Organization), der IPCC gegründet.

Von Beginn an konzentrierte sich der IPCC auf drei Bereiche. Gruppe I beschäftigt sich mit den wissenschaftlichen Aspekten des Klimawandels. Gruppe II untersucht die Konsequenzen des Klimawandels und analysiert unsere Verwundbarkeit sowie mögliche Anpassungsmaßnahmen. Gruppe III diskutiert Klimaschutzmaßnahmen, wie etwa die Minderung des Ausstoßes von Treibhausgasen und die Vergrößerung der Senken.

Bis heute sind vier vollständige Berichte veröffentlicht worden, und zwar 1990, 1995, 2001 und 2007. In jeder der drei Gruppen sind zehn bis fünfzehn Wissenschaftler aus verschiedenen Ländern für die Abfassung der einzelnen Kapitel verantwortlich. Diese Hauptautoren werten die wissenschaftlichen Publikationen aus, die für die entsprechenden Themen relevant sind. Auf der Basis dieser umfangreichen Berichte – rund 1000 Seiten von jeder Gruppe – entstehen «Zusammenfassungen für Entscheidungsträger», die wesentlich kürzer und in verständlicherem Stil abgefasst sind. Der ganze Dokumentsatz wird durch einen Synthesebericht vervollständigt. Einmal ausgearbeitet, werden die verschiedenen Dokumente von der wissenschaftlichen Gemeinschaft und den Vertretern der Regierungen rezensiert. Der Schreibprozess und der Rezensionsprozess dauern über zwei Jahre; das stellt sicher, dass der Text, der schließlich den Regierungen vorgelegt wird, auch die Zustimmung der wissenschaftlichen Gemeinschaft gefunden hat.

Die Vorhersage der Klimaerwärmung durch menschliche Aktivitäten basiert auf einer Hierarchie von Modellen, angefangen bei einfachen global gemittelten Energiebilanz-Modellen bis hin zu dreidimensionalen gekoppelten Atmosphäre-Ozean-Modellen, mit denen sich auch die geographischen Verteilungen der Klimaänderungen darstellen lassen. Der 4. Sachstandsbericht des IPCC stellt einen beispiellosen Fortschritt in der Modellierung dar. Dies gilt für die Zahl der beteiligten Institutionen (weltweit 15, darunter das MPI-M), für die Modelle selbst, für den Umfang der durchgeführten Modellrechnungen sowie für die darauf basierenden wissenschaftlichen Arbeiten.

Szenarien

Die im Rahmen des IPCC-Prozesses entwickelten Zukunftsszenarien für den Zeitraum 2001 bis 2100 basieren auf unterschiedlichen Annahmen über den demographischen, gesellschaftlichen, wirtschaftlichen und technologischen Wandel. Den für den 4. Sachstandsbericht des IPCC ausgewählten Emissionsszenarien A2, A1B und B1 liegen folgende sozio-ökonomische Annahmen zugrunde:

Die Szenarienfamilie A2 beschreibt eine sehr heterogene Welt. Die Geburtenraten der verschiedenen Regionen nähern sich nur langsam an, was zu einem kontinuierlichen Anstieg der Weltbevölkerung führt. Wirt-

schaftliches Wachstum ist vor allem regional orientiert, und das Wirtschaftswachstum pro Kopf sowie der technologische Wandel verändern sich heterogener und langsamer als in anderen Szenarienfamilien.

Die Szenarienfamilie A1 beschreibt eine Welt mit sehr raschem wirtschaftlichen Wachstum, mit einer Weltbevölkerung, deren Zahl bis Mitte des 21. Jahrhunderts zunimmt und danach abnimmt, und mit einer raschen Einführung von neuen und effizienteren Technologien. Die drei A1-Gruppen unterscheiden sich durch ihren jeweiligen technologischen Schwerpunkt: intensive Nutzung fossiler Brennstoffe (A1FI), intensive Nutzung nicht-fossiler Energiequellen (A1T) oder Ausgeglichenheit über alle Energieträger hinweg (A1B).

Die Szenarienfamilie B1 beschreibt eine Welt mit der gleichen Zu- und Abnahme der Weltbevölkerung wie in Szenario A1, jedoch mit raschen Veränderungen bei den wirtschaftlichen Strukturen hin zu einer Dienstleistungs- und Informationswirtschaft, deutlich geringerer Materialintensität sowie der Einführung von emissionsarmen und ressourcenschonenden Technologien. In diesem Szenario liegt der Schwerpunkt auf globalen Lösungen, die in Richtung wirtschaftliche, soziale und ökologische Nachhaltigkeit weisen. Zusätzliche Klimaschutzinitiativen werden allerdings nicht berücksichtigt.

Nach diesen Vorgaben wurden von einer IPCC-Arbeitsgruppe Emissionsszenarien für die wichtigsten klimawirksamen Gase und Aerosole erstellt (Beispiele in Tab. 1). Daraus wurde mit Hilfe von biogeochemischen Modellen der zeitliche Verlauf der atmosphärischen Konzentrationen für den Zeitraum 2001–2100 in den Szenarien A2, A1B und B1 berechnet. Selbst im relativ «günstigen» B1-Szenario wird sich der vorindustrielle Wert von 280 ppmv (millionstel Volumenanteil) am Ende des 21. Jahrhunderts fast verdoppelt haben (550 ppmv). Im A1B-Szenario erreicht die atmosphärische CO₂-Konzentration 700 ppmv, im A2-Szenario 830 ppmv.

Bereits heute ist die Zusammensetzung der Erdatmosphäre mit einer CO₂-Konzentration von 380 ppmv anders als während der gesamten vergangenen 650 000 Jahre, also dem Teil der letzten Eiszeitzyklen, für den sehr präzise Daten vorliegen. So lag die CO₂-Konzentration in der Atmosphäre zum jeweiligen Höhepunkt einer Eiszeit bei etwa 200 ppmv und zum Höhepunkt einer Warmzeit bei 300 ppmv. Insofern wird die Veränderung der Erdatmosphäre im 21. Jahrhundert dramatisch sein, selbst im Vergleich mit den großen Eiszeiten.

Jahr	CO ₂ -Emissionen (PgC/Jahr)			SO ₂ -Emissionen (TgS/Jahr)		
	A2	A1B	B1	A2	A1B	B1
2000	8	8	8	69	69	69
2020	12	13	11	100	100	75
2040	16	15	12	109	69	79
2060	19	16	10	90	47	56
2080	23	15	7	65	31	36
2100	29	13	4	60	28	25

Tabelle 1: Emissionen von Kohlendioxid (CO₂) und Schwefeldioxid (SO₂) aus fossilen Brennstoffen, industriellen Aktivitäten und Landnutzungsänderungen in den IPCC-Szenarien A2, A1B und B1. 1 Petagramm Kohlenstoff (PgC) = 1 Milliarde Tonnen Kohlenstoff, 1 Teragramm Schwefel (TgS) = 1 Million Tonnen Schwefel.

Die in den IPCC-Szenarien für den Zeitraum 2001–2100 berechneten atmosphärischen Konzentrationen von Treibhausgasen und Aerosolen werden in unserem Klimamodell vorgeschrieben, die vorgeschriebenen Konzentrationen für den Zeitraum 1860–2000 wurden aus Beobachtungen gewonnen. Neben dem CO₂ wurden im Modell auch Methan (CH₄), Distickstoffoxid (N₂O), Ozon (O₃), die wichtigsten chlorierten Fluorkohlenwasserstoffe (CFCs) sowie das Sulfataerosol (SO₄) berücksichtigt, das in der Atmosphäre durch Oxidation des emittierten Schwefeldioxids (SO₂) entsteht.

Klimamodelle des Max-Planck-Instituts für Meteorologie

Klimamodelle dienen als theoretische Werkzeuge zur Erforschung der Zusammenhänge im Klimasystem. Sie sind die einzige «Sprache», in der sich die komplexen Prozesse im Klimasystem quantitativ ausdrücken lassen. Die deutschen IPCC-Simulationen wurden mit globalen Klimamodellen des Max-Planck-Instituts für Meteorologie durchgeführt. Das Basismodell (kurz: IPCC-Modell) besteht aus zwei Hauptkomponenten, dem Atmosphären- und Landoberflächenmodell ECHAM5 und dem Ozeanmodell MPI-OM. Die horizontale Auflösung des Atmosphärenmodells beträgt 1,875°, was einem Gitterabstand von etwa 200 km am Äquator entspricht. Die horizontale Auflösung des Ozeanmodells be-

trägt $1,5^\circ$, was einem Gitterabstand von etwa 160 km am Äquator entspricht. Das Modell enthält die im Modellgitter darstellbaren («aufgelösten») Prozesse sowie die nicht aufgelösten («parametrisierten») Prozesse, die für die Transporte von Impuls, Energie und Wasser im Erdsystem von Bedeutung sind.

Die Tests von Klimamodellen verlaufen in der Regel in zwei Stufen. Zuerst werden die einzelnen Modellkomponenten (z. B. Atmosphäre oder Ozean) entwickelt und optimiert. Atmosphärenmodelle werden beispielsweise mit beobachteten Randbedingungen (Meeresoberflächentemperatur und Meereis) der 1980er und 1990er Jahre angetrieben. Das simulierte Klima wird dann mit dem beobachteten Klima dieser Jahre verglichen. In der zweiten Stufe werden die Modellkomponenten gekoppelt und in Simulationen über mehrere Jahrhunderte getestet. Es wird dabei vor allem auf die Stabilität des Klimas und auf jene Phänomene geachtet, die direkt von den Kopplungsprozessen abhängen, wie beispielsweise auf die Meereisverteilung oder die El Niño/La Niña-Oszillationen im tropischen Pazifik. Mit dem IPCC-Modell lief eine Simulation über 500 Jahre mit konstanten vorindustriellen Konzentrationen von CO_2 und anderen Treibhausgasen. Erwartet wird unter diesen Bedingungen ein nahezu trendfreier Klimazustand. Tatsächlich steigt die globale bodennahe Lufttemperatur in dieser 500-jährigen Simulation nur unwesentlich an, und zwar um etwa $0,03^\circ\text{C}$ pro Jahrhundert. Diese Simulation des vorindustriellen Klimas liefert die Anfangswerte für die Simulationen des Klimas im 19. und 20. Jahrhundert und die anschließenden Klimaprojektionen für das 21. Jahrhundert.

Ein weiterer Standardtest besteht darin, zu untersuchen, ob das Modell in der Lage ist, bei beobachtetem externen Antrieb (Treibhausgase, Aerosole, Sonneneinstrahlung, Vulkaneruptionen) den beobachteten Klimatrend des 19. und 20. Jahrhunderts zu reproduzieren. Dabei ist zu beachten, dass die Temperaturschwankungen von Jahr zu Jahr natürlichen Ursprungs sind und sich überwiegend auf El Niño/La Niña-Oszillationen zurückführen lassen. Diese natürlichen Oszillationen können prinzipiell nur in ihren statistischen Eigenschaften (z. B. Häufigkeit und Amplitude), nicht aber in der beobachteten Abfolge wiedergegeben werden. Prinzipiell reproduzierbar sind dagegen längerfristige Trends infolge der Änderungen im externen Antrieb (z. B. CO_2 -Anstieg), aber auch kurzfristige Temperaturänderungen nach starken Vulkanausbrüchen. Das IPCC-Modell reproduziert die beobachteten längerfristigen

Temperaturtrends im 19. und 20. Jahrhundert. Allerdings überschätzt das Modell die Abkühlung der Erdoberfläche nach größeren Vulkanausbrüchen wie nach dem Ausbruch des Krakatau im Jahre 1883, was vermutlich auf unzureichende Kenntnis über die emittierten Schwefelmengen zurückzuführen ist.

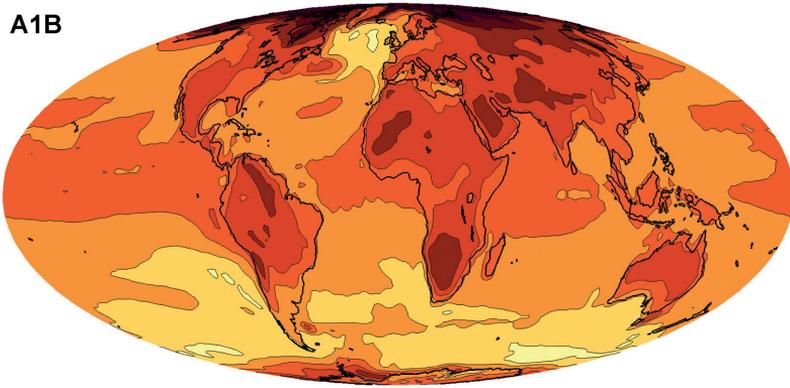
Ergebnisse der Klimaprojektionen

Temperatur und Niederschlag Die Zunahme der Treibhausgase und Veränderungen bei den Schwefelemissionen führen im IPCC-Modell zu einer globalen Erwärmung, die – bezogen auf das Mittel der Jahre 1961–1990 – im Jahr 2100 Werte zwischen 2,5 °C (B1) und 4,1 °C (A2) erreicht. Gemessen an den unterschiedlichen CO₂-Konzentrationen in A2 und A1B sind die Erwärmungsraten unerwartet ähnlich (3,7 °C in A1B). Das liegt daran, dass die abkühlende Wirkung der Schwefelaerosole in der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts in A1B deutlich schneller abnimmt als in A2 (Tab. 1). Damit ist die durch verringerte Schwefelemissionen bedingte Erwärmung in A1B größer als in A2 und kompensiert zum Teil den schwächeren CO₂-Anstieg in A1B.

Die geographische Verteilung der erwarteten Temperaturänderungen im 21. Jahrhundert ist in Abbildung 1 für die Szenarien A1B und B1 dargestellt. In beiden Szenarien heizen sich die Kontinente schneller auf als die Ozeane. Besonders ausgeprägt ist die Erwärmung in hohen nördlichen Breiten, in denen die Ausdehnung von Schnee- und Meereisflächen abnimmt, wobei helle Eis- und Schneeflächen durch relativ dunkles Wasser und schneefreies Land ersetzt werden. Damit wird ein größerer Anteil der Sonneneinstrahlung in Wärme umgewandelt, wodurch die Temperatur weiter ansteigt. In diesem selbstverstärkenden Prozess liegt der Hauptgrund für die extrem großen Temperaturänderungen in hohen nördlichen Breiten. Die Ozeane reagieren relativ träge, da die Erwärmung aufgrund von vertikalen Mischungsprozessen über ein größeres Volumen verteilt wird als über Landflächen. Besonders effizient wirken die vertikalen Mischungsprozesse im Nordatlantik und im südlichen Ozean. Hier werden daher auch die geringsten Erwärmungsraten simuliert.

Die globale Erwärmung führt unmittelbar zu höheren Verdunstungsraten und damit auch zu höheren Niederschlägen. Die jährlichen Nie-

A1B



B1

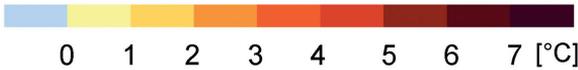
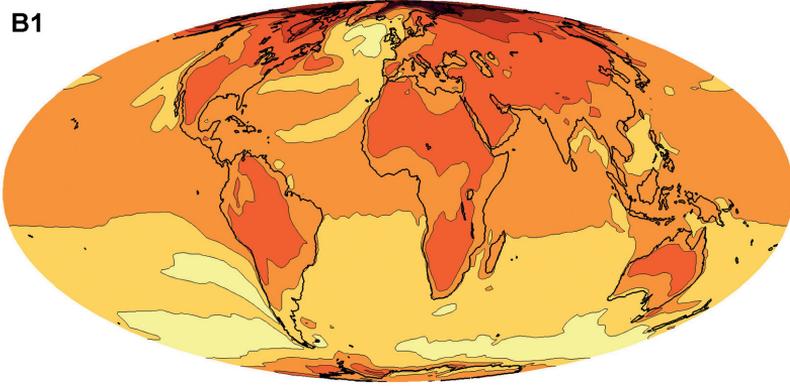


Abbildung 1: Temperaturänderungen in Erdbodennähe in den Szenarien A1B und B1. Gezeigt ist die Differenz der 30-Jahresmittel 2071–2100, minus 1961–1990.

derschläge nehmen im globalen Mittel in allen drei Szenarien mit der Zeit zu und erreichen im Jahr 2100 Zuwächse zwischen etwa 5% (B1) und 7% (A2, A1B) gegenüber dem Mittelwert der Periode von 1961 bis 1990. Höhere Niederschläge treten vor allem in Äquatornähe sowie in hohen geographischen Breiten auf (Abb. 2), geringere Niederschläge vor allem in den Subtropen (Mittelmeergebiet, Südafrika, Australien, subtropische Ozeangebiete). Das verstärkt die Gegensätze zwischen trockenen Klimazonen (Subtropen) und feuchten Klimazonen (Tropen, hohe Breiten). Die Änderungen des Niederschlags in Europa und anderen Gebieten (z. B. Südamerika, Zentralafrika) hängen eng mit der jahreszeitlichen Verschiebung der Klimazonen zusammen. Im Mittelmeergebiet

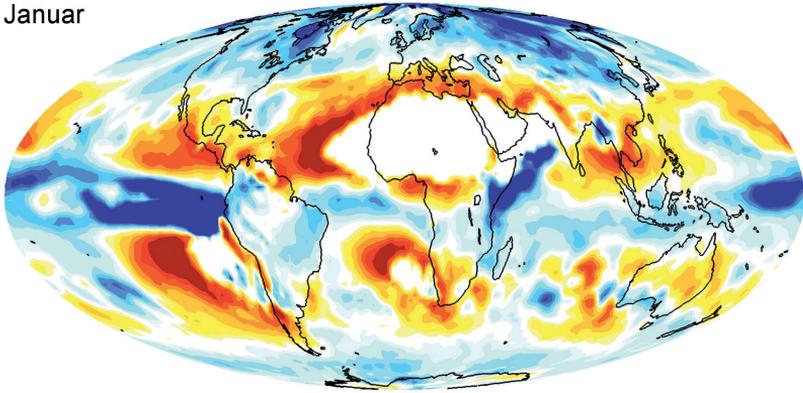
wird eine ausgeprägte Niederschlagsabnahme im Winter simuliert. Im Sommer wandert diese Anomalie nordwärts und betrifft Teile von Süd- und Mitteleuropa. In Mitteleuropa und besonders in Skandinavien nehmen die Niederschlagsmengen im Winter zu.

Extreme Wetterereignisse Unter extremen Wetterereignissen versteht man sehr seltene, überdurchschnittlich intensive Ereignisse mit schwerwiegenden Folgen für Natur, Mensch und Wirtschaft. Nach Angaben der Münchner Rückversicherung haben die durch extreme Wetterereignisse verursachten sozioökonomischen Schäden in den letzten Jahrzehnten drastisch zugenommen. Faktoren wie die wachsende Bevölkerungsdichte – besonders in Ballungsgebieten – sowie steigende Lebens- und Technologiestandards, die anfälliger für extreme Wettersituationen sind, können zu größeren Schäden führen. Analysen von langjährigen Klimadaten sollen aufzeigen, ob das erhöhte Schadensaufkommen auch durch die Zunahme der Häufigkeit oder der Intensität von extremen Wetterereignissen verursacht worden ist. Die Modellsimulationen des vergangenen Klimas sowie die IPCC-Klimaprojektionen liefern umfangreiches Datenmaterial, das Einblicke in mögliche Veränderungen von intensiven Wetterereignissen erlauben sollte.

Bei den sehr seltenen «Jahrhundertereignissen» – wie etwa dem europäischen Hitzesommer des Jahres 2003 – sind statistische Aussagen über Trends im Auftreten praktisch nicht möglich. Anders sieht dies bei den häufigeren intensiven Ereignissen aus, die z. B. einmal im Jahr auftreten. Zur Vereinfachung des globalen Datenvergleichs und der einheitlichen Analyse von intensiven Wetterereignissen wurden Indikatoren für intensive Temperatur- und Niederschlagsereignisse eingeführt, die moderate Wetterextreme auf größeren zeitlichen und räumlichen Skalen beschreiben. Sie eignen sich daher auch für globale Klimamodelle, die im Rahmen ihrer horizontalen Auflösung von 100 bis 200 km nur länger andauernde und großräumige Ereignisse – wie etwa mehrtägige Starkniederschläge als Auslöser für Flutkatastrophen oder länderübergreifende Hitzewellen – erfassen können. In orographisch stark geprägten Gebieten oder für kleinräumige Extreme sollte man hingegen feiner auflösende Regionalmodelle oder statistische Analysemethoden in Betracht ziehen.

Indikatoren auf der Basis von globalen Beobachtungsdaten der letzten 50 Jahre zeigen generell einen Anstieg der Nachttemperaturen und der Dauer von Hitzewellen, eine Abnahme der Frosttage sowie eine Zunahme

Januar



Juli

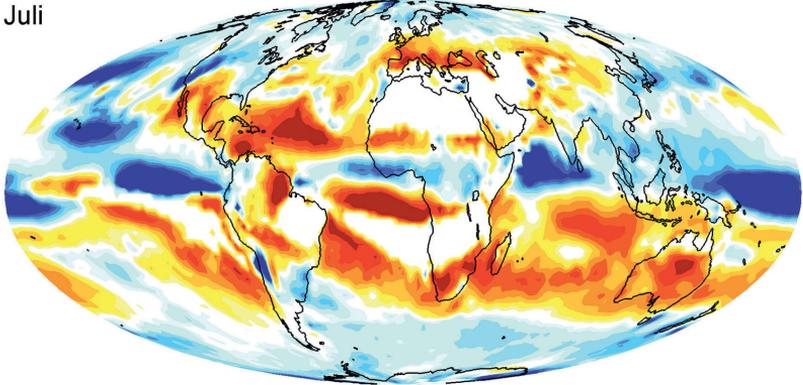


Abbildung 2: Niederschlagsänderungen im Januar und Juli für das Szenario A1B. Gezeigt sind die relativen Änderungen (in %) im Zeitraum 2071–2100, bezogen auf die Mittelwerte der Jahre 1961–1990.

der nassen Tage bzw. der maximalen 5-Tages-Niederschlagsmengen während eines Jahres. Berechnungen der genannten Indikatoren mit dem IPCC-Klimamodell bestätigen diese Veränderungen für das 20. Jahrhundert. In den Klimaprojektionen für das 21. Jahrhundert setzen sich die Trends fort, wobei sie in den extremeren A2- und A1B-Szenarien erwartungsgemäß stärker ausfallen als im B1-Szenario. In weiten Teilen der Erde nimmt die maximale 5-Tages-Niederschlagsmenge und damit auch die Hochwassergefahr zu, wenn man das Ende des 21. Jahrhunderts (2071–2100) mit dem Mittelwert der Jahre 1961–1990 vergleicht. In Europa zeichnet sich dieser Trend vor allem für die Wintermonate ab.

Gleichzeitig steigt die maximale Dauer der Trockenperioden während eines Jahres an. Dies ist in Mittel- und Südeuropa sowie in niederen geographischen Breiten (Mittelamerika, Brasilien, südliches Afrika, Australien) besonders ausgeprägt. Zusätzlich zu den Änderungen des mittleren Niederschlags (Abb. 2) wird somit auch eine Zunahme in den Extremen beiderlei Vorzeichens simuliert. Starkniederschläge haben einen immer größeren Anteil am mittleren Niederschlag, während gleichzeitig die zeitlichen Abstände zwischen Niederschlagsereignissen größer werden.

Wie zu erwarten, nimmt im wärmeren Klima auch die Dauer der Hitzeperioden zu. Im 20. Jahrhundert dauerte eine Hitzeperiode in Europa – mit Temperaturen von mindestens 5 °C über dem monatlichen Klimamittel – durchschnittlich etwa 10 Tage. Am Ende des 21. Jahrhunderts beträgt die mittlere Dauer im A1B-Szenario über 60 Tage. Temperaturen, wie sie während der Hitzewelle im Sommer 2003 in Europa auftraten, würden dann zur Normalität.

Die Hurrikan-Saison des Jahres 2005 hat sehr dramatisch das Schadenspotenzial extremer tropischer Stürme gezeigt. Ob diese Stürme in einem wärmeren Klima mit höheren Wassertemperaturen an Häufigkeit, Stärke oder beidem zunehmen, ist in der Wissenschaft umstritten. Dies liegt unter anderem daran, dass die Maschenweite heutiger Klimamodelle von typischerweise 100 bis 200 km nicht ausreicht, um tropische Stürme realistisch simulieren zu können. Deren Gesamtzahl wird in Klimamodellen systematisch unterschätzt, und Hurrikanstufen mit Windgeschwindigkeiten von mehr als 118 km pro Stunde werden nicht erreicht. Die Klimaprojektionen für das 21. Jahrhundert zeigen zwar mit zunehmender globaler Erwärmung eine Abnahme in der Häufigkeit und eine leichte Zunahme in der Stärke tropischer Stürme. Allerdings gelten diese Aussagen aus den oben genannten Gründen nicht unbedingt für Hurrikane.

Im Gegensatz zu tropischen Stürmen werden Stürme in mittleren geographischen Breiten in ihrer statistischen Gesamtheit realistisch simuliert. Dies gilt für die Lage der Zugbahnen, die Gesamtzahl der Stürme, deren saisonale Variationen und insbesondere auch für die Häufigkeitsverteilung in Abhängigkeit von der Windstärke. In den Klimaprojektionen für das 21. Jahrhundert sinkt die Gesamtzahl der Stürme mit zunehmender Erwärmung. Bei den extremen Stürmen wird eine leichte Zunahme simuliert. Die Änderungen fallen jedoch regional sehr unterschiedlich aus: So erhöht sich in Mitteleuropa die mittlere Stärke der Winterstürme

um etwa 10%, während die regenbringenden Winterstürme im Mittelmeergebiet sowohl an Zahl wie an Stärke signifikant abnehmen. Darin liegt der Hauptgrund für die dortige Abnahme der Niederschläge im Winter (Abb. 2) und die Verlängerung der Trockenperioden.

[...]