

Karl-Heinz Bernhardt

Das Klimasystem der Erde im Licht des fünften IPCC-Sachstandsberichtes

Erweiterte Fassung eines Vortrages vor der Klasse Naturwissenschaften und Technikwissenschaften der Leibniz-Sozietät der Wissenschaften zu Berlin am 12. 06. 2014

Vorbemerkung:

Gegenstand der nachstehenden Ausführungen ist im wesentlichen der Bericht der Arbeitsgruppe I (Working Group I – The Physical Science Basis) im Rahmen des Fifth Assessment Report (AR5) des IPCC, der seit 30. Januar 2014 im Umfang von 1535 Seiten (375 MB) über die Website www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/ online-verfügbar ist und kostenfrei heruntergeladen werden kann, nachdem die Zusammenfassung für Entscheidungsträger (Summary for Policymakers) bereits im September 2013 gebilligt und bald danach über online bereit gestellt worden war. Eine Druckversion steht seit Ende März zur Verfügung (IPCC 2013). Die Verabschiedung der Berichte der Arbeitsgruppen II (Impacts, Adaptation and Vulnerability) und III (Mitigation of Climate Change) als "Final Drafts" ist im März bzw. April erfolgt, die Vorlage eines zusammenfassenden Berichtes (Synthesis Report) für Oktober 2014 vorgesehen. Im folgenden werden ausgewählte Ergebnisse des Sachstandsberichtes – auch unter Hinzuziehung neuester Publikationen – diskutiert.

1. Arbeitsweise und Struktur des IPCC

Der Zwischenstaatliche Ausschuss für Klimaänderung(en) (Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC) wurde im Jahre 1988 gemeinsam von der Weltorganisation für Meteorologie (WMO) und dem Umweltprogramm der Vereinten Nationen (UNEP) ins Leben gerufen und im Jahre 2007 gemeinsam mit Albert Arnold Gore (Al Gore) mit dem Nobelpreis ausgezeichnet. Die auch in offiziellen deutschsprachigen Dokumenten anzutreffende Bezeichnung als "Weltklimarat" ist unzutreffend und könnte nicht vorhandene Handlungsmöglichkeiten oder Entscheidungsbefugnisse suggerieren, vergleichbar etwa mit denen eines Sicherheits- oder ähnlichen Rates (Council). In Wahrheit handelt es sich bei dem genannten zwischenstaatlichen Ausschuss um ein Gremium, dem Wissenschaftler aus aller Welt, Regierungen von Staaten (zur Zeit 195 Länder) und Beobachter von internationalen Organisationen angehören. Seine Tätigkeit kann derzeit als "policy relevant, but not policy prescriptive" charakterisiert werden.

Weitere Informationen – auch zur Finanzierung der IPCC-Aktivitäten – sind über die oben genannte Internet-Adresse und zusätzlich auch von der Deutschen IPCC-Koordinierungsstelle (<u>www.de-ipcc.de</u>) erhältlich.

Der Ausschuss betreibt keine eigenständige Forschungsarbeit, sondern organisiert eine Zusammenschau – in gewissem Sinne Metaanalysen – weltweit vorliegender wissenschaftlicher Arbeiten zum Problem des Klimawandels, seiner sozialökonomischen Auswirkungen sowie möglicher Anpassungs- und Gegenmaßnahmen. Entsprechende Einschätzungen (Assessment Reports) sind auf die Jahre 1990, 1995, 2001, 2007 und 2013 datiert. Die Erarbeitung des jetzt vorliegenden fünften Sachstandsberichtes (AR5) wurde im Jahre 2008 beschlossen; an ihm wirkten über 2000 Wissenschaftler, davon 831 als Hauptautoren mit. Die Berichte bestehen jeweils aus einer für Anwender/Entscheidungsträger bestimmten prägnanten Zusammenfassung der Hauptergebnisse (Summary for Policymakers – SPM), einer komprimierten Darstellung für Fachleute (Technical Summary – TS) und einer sehr ausführlichen Darlegung und Diskussion der zusammengetragenen Materialien mit Schlussfolgerungen. Allein der Bericht der Arbeitsgruppe I wurde von insgesamt 259 Autoren aus 39 Ländern verfasst, und ca. 800 Experten haben zu den Entwürfen (zero, first und second order drafts) über 54000 Kommentare beigesteuert; das Literaturverzeichnis enthält mehr als 9000 Quellenangaben.

Die in dem Sachstandsbericht getroffenen Aussagen sind mit Angaben über das in sie zu setzende Vertrauen ("confidence in the validity of a finding") bzw. über die Übereinstimmung zwischen den Autoren sowie über Sicherheit/Unsicherheit des Inhaltes der Aussagen versehen. So wird zwischen "low/medium/high confidence" unterschieden, und es werden (subjektive) Wahrscheinlichkeiten ("likelihood of the outcome"), wie beispielsweise "very unlikely" (0-10% Wahrscheinlichkeit), "likely" (66-100) oder very likely (90-100%) angegeben (IPCC 2013, p. 36). Beispielsweise war nach der Zusammenfassung für Entscheidungsträger der Zeitraum von 1983 bis 2012 auf der Nordhalbkugel "likely" die wärmste 30-jährige Periode der letzten 1400 Jahre, allerdings mit "medium confidence" (IPCC 2013, p.5) So stellt der Bericht nicht nur ein unter dem Gesichtspunkt des Klimawandels zusammengestelltes Kompendium des heutigen Standes der Meteorologie dar, sondern widerspiegelt zugleich die Unsicherheit unseres Wissens. Am Ende des Technical Summary (IPCC 2013, pp. 114-115) listet ein eigener Abschnitt "Key Uncertainties" im gegenwärtigen Verständnis des Klimasystems auf. Die Verfasser der IPCC-Berichte zählen jedenfalls nicht zu jenen Klimaforschern, von denen v. Storch 2013 meinte, sie würden "den Eindruck… erwecken, sie würden endgültige Wahrheiten verkünden."

2. Klimasystem und Klimawandel

Das Klimasystem der Erde wurde in seinen Bestandteilen unseres Wissens erstmals in Humboldts "Kosmos" (1845) umrissen (Bernhardt 2003, S. 210ff., Bernhardt 2009, S. 133) und seither mehrfach ausführlich beschrieben (z. B. Hupfer 1991) bzw. in Schaubildern skizziert, so von Flohn und Hantel, oder im zweiten IPCC-Sachstandsbericht aus dem Jahre 1996 (Abb. 1). Sowohl interne Schwankungen als auch externe Anregungen dieses hochkomplexen nichtlinearen, mit zahlreichen Rückkoppelungsmechanismen ausgestatteten Systems bewirken Klimaschwankungen in den unterschiedlichsten Raum- und Zeitbereichen und lassen den ständigen Klimawandel als "Daseinsweise des Klimas" erscheinen (vgl. Bernhardt 2009, darunter unsere Thesen 1 und 2).

Einseitige Interpretationen, wonach "sich das Klima ändert und … dies auf menschlichen Einflüssen beruht" oder die Deklaration der "Bekämpfung des Klimawandels als zentrale gesellschaftliche Herausforderung", wie sie im Umfeld von Diskussionsforen zum fünften Sachstandsbericht zu hören waren, lassen den komplexen Charakter des Klimawandels außer Acht, der neben den genannten internen Schwankungen im Klimasystem von Antrieben ("forcing") verursacht wird, die ihrerseits zwar teilweise anthropogenen Ursprungs (Emission strahlungsaktiver Spurengase und Aerosole, Landnutzung), teilweise aber auch natürlicher Herkunft (Sonnenaktivität, Vulkantätigkeit) sind.

Über der Abmilderung ("mitigation") des menschlichen Einflusses auf den weiteren Klimawandel, speziell die globale Erwärmung, darf die Anpassung ("adaptation") an den derzeitigen und an den zu erwartenden künftigen Klimawandel als gesellschaftliche Herausforderung keinesfalls übersehen werden – beide Optionen sind Gegenstand vergleichbar umfangreicher IPCC-Sachstandsberichte, wie einleitend bemerkt. Dabei schließt weiterentwickelte Anpassung angemessene Reaktionen auf das Auftreten außergewöhnlicher Witterungsereignisse auch im gegenwärtigen Klimaregime ein!

Durchaus im Sinne unserer Auffassung des Klimas als der statistischen Gesamtheit atmosphärischer Zustände und Prozesse in ihrer raumzeitlichen Verteilung (Bernhardt 1987)¹ wird im neuesten Sachstandsbericht das Klima als "the average weather", "as the statistical description in terms of the mean and variability of relevant quantities over a period of time ranging from months to thousands or millions of years" mit Hinweis auf die klassische 30jährige Mittelungsperiode definiert, im weiteren Sinne unter Einbeziehung der "associated statistics (frequency, magnitude, persistence, trends, etc.) often combining parameters to describe phenomena such as droughts" (IPCC 2013, p. 126).

¹ "Statistische Gesamtheit" meint in diesem Zusammenhang eine mit statistischen Methoden zu beschreibende Gesamtheit reeller (beobachteter) oder virtueller (simulierter) atmosphärischer Zustände und Prozesse. Erstere sind Gegenstand der Klimadiagnostik und kennzeichnen das Realklima, letztere bilden die Grundlage für Aussagen über das künftige Klima.

Damit können Aussagen über Klimaänderungen an Hand des Verhaltens ausgewählter Parameter nur aus mehrjährigen, z. B. dreißig- oder zumindest zehnjährigen Mittelwerten, nicht aber aus einzelnen Jahresmittelwerten abgeleitet werden!

Was nun den vieldiskutierten Stand der "globalen Erwärmung" – genauer des Anstiegs der global gemittelten Temperatur an der (festen und flüssigen) Erdoberfläche – anlangt, so zeigen die Beobachtungen einen kontinuierlichen Anstieg der jeweils über ein Jahrzehnt gebildeten globalen Mitteltemperatur um insgesamt über 0,5 K für die Dekaden ab 1971-1980 bis 2001-2010, von denen die letzten drei um jeweils etwa. 0,16 K wärmer als die vorangegangene ausgefallen sind und allesamt eine höhere Mitteltemperatur als sämtliche Dekaden seit Beginn der Reihe im Jahre 1850 aufweisen (Abb. 2a, unten) Ein anderes Bild bieten die vor allem durch interne Schwankungen im Klimasystem geprägten Mitteltemperaturen der einzelnen Jahre, die im oberen Teil der Abb. 2a nach drei verschiedenen Datenreihen² bis zum Jahre 2012 wiedergegeben sind. Dabei fällt das durch ein starkes, systeminternes El Niño-Ereignis mit weiträumig erhöhten Meeresoberflächentemperaturen im tropischen Pazifik geprägte Jahr 1998 durch eine vergleichsweise hohe globale Mitteltemperatur auf, die in den nachfolgenden Jahren zunächst deutlich abgefallen ist. Eine Ergänzung der hier wiedergegebenen Messreihen durch den Mittelwert des Jahres 2013 (WMO 2014) lässt allerdings das letztere wieder deutlich wärmer als die beiden Vorgängerjahre 2011 und 2012 erscheinen und gemeinsam mit dem Jahr 2007 an sechster und siebenter Stelle in der Rangfolge der bisher wärmsten Jahre seit dem Beginn der Datenreihe im Jahre 1850 stehen. Mit der einzigen Ausnahme des bereits genannten Jahres 1998 entfallen danach alle 12 der bisher wärmsten Jahre auf das 21. Jahrhundert (ab dem Jahr 2001)!

Erscheint es einerseits fragwürdig, eine durch mehrere aufeinander folgende Dekadenmittelwerte gekennzeichnete Temperaturzunahme mit einem einzelnen Jahr für beendet zu erklären (z. B. Malberg 2014), so ist andererseits bei einer Analyse im interannuellen Maßstab ein Rückgang der mittleren Erwärmungsrate seit Ende des 20. Jahrhunderts unübersehbar. So ergibt eine lineare (!) Interpolation für den Zeitraum von 1951 bis 2012 einen Anstieg der mittleren Temperatur an der Erdoberfläche um 0,12 K pro Jahrzehnt, dagegen nur noch um 0,05 K pro Dekade für die Jahre von 1998 bis 2012, was – unbeschadet der Existenz systeminterner Schwankungen ("natural variability") – ein nähere Betrachtung erfordert.

Vorher sei aber noch ausdrücklich auf die auch im IPCC-Bericht reflektierte, durch Veränderungen im atmosphärischen Zirkulationsregime bedingte regionale Differenziertheit des globalen Temperaturanstiegs verwiesen, wie sie beispielsweise aus der weltweiten Verteilung der beobachteten Temperaturanstiegs für den Zeitraum von 1901 bis 2012 erhellt (Abb.2b). Speziell für den mitteleuropäischen Raum setzte nach der bis in das Jahr 1761 zurückreichenden synthetischen Temperaturreihe (Stationen de Bilt, Berlin/Potsdam, Basel und Wien, Baur 1975) (Bernhardt 2013a) der markante Temperaturanstieg in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts bereits mit dem Jahrzehnt 1961-70 ein und beträgt seither im Mittel mehr als 0,3 K pro Dekade (Abb. 3, vgl. auch Bernhardt 2013). Im hemisphärischen Scale ermöglichen Fortschritte der Paläoklimatologie sowohl bei der Auswertung von Proxydaten als auch bei der Klimamodellierung unter Berücksichtigung von Vulkanausbrüchen, Schwankungen der solaren Einstrahlung und der Konzentration strahlungsaktiver Spurengase ("Treibhausgase") eine detaillierte Darstellung des Temperaturgangs auf der Nordhalbkugel im letzten Jahrtausend (Abb. 4), in der die mittelalterliche Klimaanomalie (950-1250 u. Z.)³ ebenso deutlich sichtbar ist wie die in Schüben verlaufende und mit Beginn des 19. Jahrhundert ausklingende "kleine

² Verwendung fanden Datensätze von Hadley Centre/Climate Research Unit (HadCRUT4), Merged Land-Ocean Surface Temperature Analysis (MLOST) und Goddard Institute for Space Studies Surface Temperature Analysis (GISTEMP). Vgl. auch IPCC 2013, p. 37. Wegen weiterer Details dieser und der nachfolgenden Abbildungen aus dem IPCC-Sachstandsbericht muss auf den Bericht selbst einschließlich anschließender Online-Materialien verwiesen werden.

³ "Medieval Climate Anomaly" dürfte eine zutreffendere Bezeichnung als "Mittelalterliches Klimaoptimum" sein, denkt man an die Häufung von Dürrejahren, Überschwemmungen und schweren Sturmfluten (z. B. Bernhardt, Mäder 1987, Lamb 1994, S. 210 ff.)

Eiszeit" samt der anschließenden Erwärmung, die in diesem Rahmen den Charakter eines Jahrtausendereignisses trägt.

Auf Änderungen weiterer, mit dem thermischen Regime unmittelbar verknüpfter Parameter, wie der mittleren täglichen Temperaturmaxima und -minima oder der Zahl der heißen und der Frosttage wird unter Verweis auf das ausführliche IPCC-Material hier nicht eingegangen, ebenso wenig wie auf das regional sehr uneinheitliche Verhalten des Niederschlagsregimes (vgl. Abb. 5). Was die Häufigkeit extremer Witterungsereignisse in neuerer Zeit anlangt, hat seit Mitte des 20. Jahrhunderts die Häufigkeit von Hitzewellen zumindest über großen Teilen Europas, Asiens und Australiens zugenommen, ebenso Häufigkeit und Intensität von Starkniederschlägen mit erheblichen jahreszeitlichen und regionalen Unterschieden (IPCC 2013, p. 46, vgl. auch p. 7). Im atmosphärischen Zirkulationsregime hat sich die Tropenzone seit den 70er Jahren polwärts ausgeweitet, verbunden mit einer Verlagerung der Zyklonenbahnen und der Strahlströme (IPCC 2013, p.39). Nach neuesten Befunden (Krossin et al. 2014) haben sich auch die Orte maximaler Intensität im Lebenslauf der tropischen Zyklonen polwärts verschoben, im Verlauf der letzten 30 Jahre um 53 bzw. 62 km pro Jahrzehnt auf der Nord- bzw. der Südhalbkugel. Cohen et al. 2014 sowie Coumou et al. 2014 diskutieren verschiedene dynamische Mechanismen, die über Verlagerung und Abschwächung des Strahlstroms, Veränderungen der Zyklonenbahnen sowie der planetaren Wellen mit Ausbildung über lange Zeit quasistationärer Rossbywellen eine zunehmende Häufigkeit extremer Witterungsereignisse in mittleren Breiten hervorbringen könnten.

Bei der Diskussion des Klimawandels ist schließlich zu beachten, dass nicht nur in der Atmosphäre, sondern auch in den anderen Komponenten des Klimasystems – der Hydro-, Litho-/Pedo-, Kryo-, Biobzw. Noosphäre – Veränderungen in unterschiedlichsten Raum- und Zeitbereichen vor sich gehen, die für die Gesellschaft folgenreicher sein können als der Anstieg der globalen Mitteltemperatur an der Erdoberfläche. So steigt der mittlere Meeresspiegel seit Beginn des 20. Jahrhunderts im Gegensatz zum Temperaturverlauf relativ gleichförmig und in den letzen Jahren sogar beschleunigt an (IPCC 2013, p. 10), in den Jahren von 1993 bis 2010, d. h. seit dem Beginn der Satellitenaltimetrie, mit 3,2 (2,8 bis 3,6) mm/Jahr "very likely" höher als im Mittel 1,7 (1,5 bis 1,9) mm/Jahr im Zeitraum von 1901 bis 2010 (IPCC 2013, p. 11). Proxy- und Messdaten legen bereits für die Wende vom 19. zum 20. Jahrhundert den Übergang von einer über zwei Jahrtausende währenden relativ niedrigen mittleren Anstiegsrate zu dem genannten Anstieg im 20. Jahrhundert nahe (vgl. auch Spänkuch 2008). Als Hauptursache für einen globalen – natürlich regional und lokal differenziert ausgeprägten - Meeresspiegelanstieg sind die thermische Ausdehnung des Meerwassers und die Schmelze festländischer (!) Eismassen zu nennen, was eine Analyse der Energiebilanz des Klimasystems erfordert.

3. Balance und Imbalance im Klimasystem

Globale Erwärmung und Meeresspiegelanstieg zeugen von einer Imbalance des Klimasystems insgesamt, das offenbar durch solare Einstrahlung mehr Wärme zugeführt erhält, als es in Gestalt reflektierter bzw. rückgestreuter Sonnen- und emittierter (langwelliger) thermischer Ausstrahlung abgibt. Nach unserer Auffassung (Bernhardt 2012a) charakterisiert der Prozessparameter Strahlungsimbalance den Klimawandel besser als ein Zustandsparameter, wie die zwar anschauliche, aber nur als Indikator der Klimaerwärmung anzusehende und öffentlichkeitswirksam als Target für Maßnahmen zur Beschränkung des Temperaturanstieges (beispielsweise auf 2°C) brauchbare globale Mitteltemperatur an der Erdoberfläche. Vom Standpunkt der globalen Energiebilanz erscheint es allerdings sinnvoller, im Falle einer positiven Bilanz von einem "global heating" des gesamten Klimasystems zu sprechen und nicht nur das "global warming" der Lufttemperatur an der Erdoberfläche ins Auge zu fassen.

Unseres Wissens hatten erstmals Trenberth et al. 2009 eine Bilanzstörung (im Betrag von 0,9 W/m^2) in das gängige Schema der globalen Energiebilanz eingefügt. Im vorliegenden Sachstandsbericht wird (IPCC 2013, p. 39) für den Zeitraum von 1971 bis 2010 mit *high confidence* ein Energieüberschuss von 274 (196 – 351)x10²¹ J veranschlagt, was (nach linearer Interpolation der Jahreswerte) 213x10¹² W bzw., gemittelt über die gesamte Erdoberfläche, 0,42 W/m² ausmacht. Das entspricht zwar nur 0,12% des mittleren solaren Energiezuflusses an der Atmosphärenobergrenze⁴ bzw. ca. 8% des atmosphärischen Energiezyklus (Neubildung und Dissipation kinetischer Energie), beträgt aber immerhin mehr als das Doppelte des globalen Energieumsatzes in der Fotosynthese und übertrifft den geothermischen Tiefenstrom etwa um den Faktor 5 (vgl. die Tabellen bei Hupfer 1991, S. 269ff. und Bernhardt 2012b, Tab. 1, zu korrigieren nach Daten von Pollack et. al. 1993). Eine Zufuhr dieser Wärmemenge an die Atmosphäre mit einer Wärmekapazität von ca. 10⁷ J/K m² würde zu einem Temperaturanstieg, gemittelt über die gesamte Atmosphäre (und nicht nur an der Erdoberfläche!), von 1,3 K/a – also weit mehr als beobachtet - führen! Jedoch werden nach der vorliegenden Abschätzung nur 1% des Wärmeüberschusses unmittelbar an die Atmosphäre abgegeben, dagegen 93% an den Ozean bzw. 67 % an die Schichten bis zu 700 m Wassertiefe, während jeweils 3% der Erwärmung des Festlandes und - besonders folgenreich - der Gletscherschmelze zugute kommen sollen, was einer schmelzenden Masse von über 600 Gt pro Jahr bzw. einem globalen Meeresspiegelanstieg von 1,7 mm/Jahr entspräche. Dabei scheint die derzeitige globale Bilanzstörung noch im Anstieg begriffen zu sein, werden doch für den Zeitraum 1993-2010 163 (127 – 210)x10²¹ Jangegeben, was mit einem geschätzten Trend einem globalen Mittelwert über den genannten Zeitraum von 0,56 W/m² entspräche.⁵

Abb. 6 zeigt die Zunahme des Wärmeinhaltes der oberen Ozeanschicht – die allerdings spärlichen Messungen stehen in befriedigender Übereinstimmung mit der obigen Abschätzung (67% von 274x10²¹J, d. h. 18,4x10²² J über 40 Jahre) –, und im unteren Teil der Abbildung den beobachteten globalen Meeresspiegelanstieg. Der mittlere Temperaturanstieg der oberen 700 m-Schicht errechnet sich aus der angegebenen Wärmezufuhr zu 0,12 K über 40 Jahre. Für den seit Beginn der Satellitenaltimetrie zuverlässiger als vorher gemessenen globalen Meeresspiegelanstieg im Zeitraum von 1993 – 2010 wird ein Anteil von 1,1 (0,8 – 1,4) mm/Jahr der Volumenexpansion des sich erwärmenden Meerwassers, ein solcher von ca. 1,36 mm/Jahr der weltweiten Gletscherschmelze und ein weiterer Anteil von ca. 0,38 mm/Jahr einem erhöhten Abfluss vom Festland zugeschrieben, was zusammen einen Anstieg von ca. 2,8 mm/Jahr ergäbe – offensichtlich weniger, als in den letzten Jahren tatsächlich beobachtet.

In der Reihenfolge abnehmender Anteile am schmelzwasserbedingten Meeresspiegelanstieg werden von gleicher Größenordnung die Festlandsgletscher außerhalb der Peripherie der Eisschilde sowie das grönländische und das antarktische Inlandeis genannt, allerdings auf unterschiedliche Zeiträume bezogen und mit erheblichen Spannweiten. Beobachtungsmäßige Unsicherheiten und große jährliche Schwankungen betreffen insbesondere die Eisschmelze auf Grönland, die auf 34 (-6 bis 74) Gt/Jahr für den Zeitraum von 1992 bis 2001, aber auf 215 (157 – 274) Gt/Jahr für die anschließende Periode 2002 bis 2011 veranschlagt wird (IPCC 2013, p. 9), wobei ein Abschmelzen von 100 Gt Eis einen Energieaufwand von 33,4x10¹⁸ J erfordert und einen globalen Meeresspiegelanstieg 0,28 mm nach sich zieht.

Noch während der Bearbeitungszeit des Sachstandsberichtes wurde über eine extreme Eisschmelze im Jahr 2012 berichtet, die Mitte Juli 97% der Oberfläche Grönlands erfasste und von umfangreichen Gletscherabbrüchen begleitet war, nachdem schon in den Jahren vorher jährliche Eisverluste bis zu 400 Gt/Jahr beobachtet worden waren, die mit 1,1 mm/Jahr zum weltweiten Meeresspiegelanstieg beigetragen haben müssten (Wehry 2012 nach US-amerikanischen Quellen, vgl. Abb. **7**). Als Einflussfaktoren für solche Schmelzepisoden werden Rekordtemperaturen infolge einer Verlagerung der frühsommerlichen atmosphärischen Zirkulationszonen, aber auch das Eindringen warmen Meerwassers in gletscherbenachbarte Fjorde sowie regionale systeminterne Anomalien ("unforced regional climate variability") benannt (IPCC 2013, p. 47, 69). Das Auftreten besonderer synoptischer

⁴ Im vorliegenden Bericht (IPCC 2013, p. 127) wird eine total solar radiation irradiance (TSI) "generally accepted about 1361 W/m²" angenommen, was einem Mittelwert des solaren Energiezuflusses über die gesamte Atmosphärenobergrenze von 340,25 W/m² entspricht. In IPCC 2007, p. 107 ff. waren noch 1365 W/m² als "current estimate" für TSI angegeben worden.

⁵ Neuerdings haben Kratz et a. 2014 im Rahmen eines Klimastatusberichtes für das Jahr 2013 den Verlauf des Netto-Energiezuflusses an der Atmosphärenobergrenze und seiner Komponenten für den Zeitraum ab dem Jahr 2000 dargestellt und diskutiert.

Situationen - sonnenstrahlungsdurchlässige dünne tiefe Wolken mit erheblicher Erhöhung der Gegenstrahlung an der Erdoberfläche (Bennartz et al. 2013) -, aber auch lokale positive Rückkoppelungen, wie die Albedoverminderung einer tauenden Schneedecke (Wehry, a. a. O.) demonstrieren globale Auswirkungen regionaler Prozesse in Atmo-, Kryo- und (maritimer) Hydrosphäre und machen zugleich Herausforderungen an künftige weiter vervollkommnete Klimamodelle auch für den regionalen Bereich deutlich, wie z. B. aus der Arbeit von Tedesco et al. 2013 erhellt.

Auch die Eisschmelze in der Antarktis, für die im Gegensatz zu Grönland oberflächennaher Schmelzwasserabfluss keine Rolle spielt, dürfte in den letzten Jahrzehnten zugenommen zu haben, so nach IPCC 2013, p. 9 von 30 (-37 bis 74) Gt/Jahr im Zeitraum von 1992 bis 2001 auf 147 (72 - 221) Gt/Jahr im anschließenden Jahrzehnt von 2002 bis 2011. Der hauptsächlich auf die antarktische Halbinsel und die Amundsensee konzentrierte Abbau der Eisschelfe widerspiegelt offensichtlich Wechselwirkungsprozesse zwischen Schelfeisdynamik und Meeresströmungen, die augenscheinlich noch nicht voll verstanden sind. Nach einer Korrektur von satellitengravimetrischen Daten zur Massebilanz des antarktischen Eises unter Berücksichtigung der glazial-isostatischen Anpassung (GIA) kommen allerdings Sasgen et. al. 2013 für den Zeitraum von 2003 bis 2012 auf eine gegenüber den eben genannten Zahlen geringeren Abbau des antarktischen Eisschildes um durchschnittlich nur 114 (+/-23) Gt/Jahr für den Zeitraum von Januar 2003 bis September 2012, wobei den hohen Eisverlusten in der West- eine positive Massebilanz in der Ostantarktis (26 Gt/a) gegenübersteht. Jedoch finden Helm et al. 2014 für den jüngsten Zeitraum von Januar 2011 bis Januar 2014 nach satellitenaltimetrischen Daten wieder einen gegenüber dem Zeitraum von 2003 bis 2009 drastisch gesteigerten Volumenabbau der Eisschilde von 507 (+/- 107) km³/Jahr, wovon 375 (+/- 24)km³/Jahr auf Grönland entfallen.

Als Gegenstück zur energetischen soll abschließend auf die markante und folgenschwere stoffliche Imbalance des Klimasystems eingegangen werden, für die die vielgestaltige menschliche Gesellschaft – und nicht "der Mensch" an sich! – unmittelbar verantwortlich ist, ganz im Gegensatz zur anthropogenen Störung der Energiebilanz, die höchstens im klein- und mittelräumigen Bereich (Stadt- und Indusriegebiete), keinesfalls aber im großräumigen und globalen Maßstab in nennenswertem Maße auf direktem Wege durch anthropogene Energieabgabe erfolgt, sondern über Landnutzung, vor allem aber durch Anreicherung atmosphärischer Treibhausgase, d. h. über eine stoffliche Imbalance, global wirksam wird (hierzu auch Bernhardt 2013b).

Die in diesem Zusammenhang an erster Stelle zu nennende CO₂-Konzentration in der Atmosphäre hat seit dem Erscheinen der ersten IPCC-Berichte ungebremst, in den letzten Jahren beschleunigt zugenommen und im Jahr 2012 den Rekordstand von 393 ppm, entsprechend ca. 140% des vorindustriellen Wertes aus dem Jahr 1750 erreicht (WMO 2014, S. 17); gleichzeitig nimmt, gekennzeichnet durch das Absinken des pH-Wertes, die "Versauerung"⁶ der Ozeane stetig zu (Abb. 8). Nach den neuesten Abschätzungen an Hand von Wirtschafts- und Landnutzungsdaten wurden im Zeitraum von 1750 bis 2011 375 (345 bis 405)x10¹² kg Kohlenstoff durch Verbrennung fossiler Brennstoffe und Zementproduktion sowie weitere 180 (100 bis 260)x10¹² kg durch Landnutzung (hauptsächlich Entwaldung) freigesetzt. Die Gesamtmasse des bisher anthropogen freigesetzten Kohlenstoffs von $555x10^{12}$ kg, von der 240 (230 bis 250)x10¹² kg – also ca. 43% – in der Atmosphäre, der Rest im Ozean und in der Biosphäre gespeichert wurde, macht immerhin zwei Drittel des derzeitigen Kohlenstoff-Inventars unserer Lufthülle von ca. $837x10^{12}$ kg (berechnet an Hand der neuesten WMO-Daten, s. o.) aus!

Dass in langen geologischen Zeiträumen gebildete Kohlenstoffvorräte binnen einer kurzen historischen Epoche verbrannt werden, stellt selbst ein Phänomen geologischen Maßstabes dar – ganz im Sinne der Vorstellungen Vernadskijs über die Tätigkeit des Menschen als eines geologischen Faktors oder der nicht unumstrittenen Begriffsbildung eines Anthropozän (z. B. Global Change 2012). Davon zeugt auch der Umstand, dass nach der immer weiter in die Vergangenheit zurückdatierbaren Auswertung von Eisbohrkernen der gegenwärtige Anstieg der CO₂-Konzentration (wie auch der der wei-

⁶ "Versauerung" bezeichnet hier eine Verschiebung des noch schwach basischen pH-Wertes in Richtung des sauren Bereiches.

teren Treibhausgase CH₄ und N₂O) mit *"very high confidence"* ohne Beispiel für den Zeitraum der letzten 22 000 Jahre, mit *"medium confidence"* sogar für die letzten 800 000 Jahre ist. Epochen mit vergleichbarer bzw. noch deutlich höherer CO₂-Konzentration als in der Gegenwart liegen weit zurück und fallen mit 350 bis 450 ppm und um 1,9 bis 3,6 K höherer Temperatur als in der vorindustriellen Ära in das mittlere Pliozän (3,3 bis 3,5 Ma vor heute) bzw. (um 1000 ppm bzw. 9 bis 14 K) in das frühe Eozän (48 bis 52 Ma vor heute) (IPCC 2013, p. 50) Speicherung und Verbleib des aus der Atmosphäre stammenden CO₂ wiederum stellen einen höchst komplexen biogeochemischen Prozess dar, der sich über mehrere Zeitskalen erstreckt und dessen tieferes Verständnis samt verbesserter Modellierung vor allem für die Abschätzung der künftigen Entwicklung des atmosphärischen CO₂-Gehaltes und seiner Auswirkungen auf das Klima der Zukunft von eminenter Bedeutung wäre, wobei auch der Stickstoffzyklus eine Rolle spielt (IPCC 2013, p. 96f.). Die atmosphärische Konzentration der ebenfalls treibhauswirksamen Spurengase N₂O und CH₄ ist gegenüber dem Jahr 1750 ebenfalls deutlich angestiegen, und zwar um ca. 20% bzw. 60% auf 225 bzw. auf 1819 ppb (= 10⁻⁹), wobei der Anstieg über die letzten Jahrzehnte andauert, im Falle des Methans mit einer vorübergehenden Verlangsamung der Konzentrationszunahme zu Beginn des 21. Jahrhunderts.

4. Antriebe und Ablauf des Klimawandels

"Drivers of Climate Change" im Sinne des IPCC sind Substanzen und Prozesse (natürliche und anthropogene), die die Energiebilanz der Erde verändern. Deren strahlungsbedingter Anteil wird von den ersten IPCC-Berichten an als "radiative forcing" (Strahlungsantrieb) bezeichnet und dargestellt. Abb. 9 gibt die neueste Version wieder. Eingetragen sind die Veränderungen, die die Strahlungsbilanz (Summe aus kurz- und langwelligem Strahlungsfluss, abwärts gerichtete Flüsse positiv gezählt) an der Tropopause im Jahr 2011 gegenüber dem Bezugsjahr 1750 (Ende der vorindustriellen Epoche) infolge der seither eingetretenen Veränderungen von Bodenbeschaffenheit und Zusammensetzung der Atmosphäre bei unverändertem Zustand der Troposphäre, aber Anpassung der Stratosphärentemperatur an ein neues Strahlungsgleichgewicht erfahren haben soll. Der positive Strahlungsantrieb von insgesamt ca. 2 W/m² bezeichnet also jene Wärmemenge pro Zeit- und Flächeneinheit, die im globalen Mittel für die Erwärmung der Atmosphäre und ihrer Unterlage gegenüber dem Zustand des Jahres 1750 bis zur Einstellung eines neuen Strahlungsgleichgewichtes zur Verfügung steht.

Neu gegenüber früheren Darstellungen ist die zusätzliche Einführung eines effektiven Strahlungsantriebes (schraffiert gekennzeichnet), bei dessen Berechnung auch in der Troposphäre rasch eintretende Adaptationseffekte (z. B. als Folge veränderter Aerosole) berücksichtigt sind. An der Spitze der anthropogenen Antriebe stehen nach wie vor die "Treibhausgase" CO2, gefolgt in deutlichem Abstand von CH₄ und N₂O sowie den Halocarbonen. Troposphärisches Ozon wie auch stratosphärischer Wasserdampf bewirken im Klimasystem eine Erhöhung der Wärmeaufnahme, letzterer allerdings in wesentlich geringerem Maße als noch im vierten Sachstandsbericht angenommen. Stratosphärisches Ozon vermindert die Wärmeaufnahme im Klimasystem, ebenso wie in der Regel Änderungen der Landnutzung durch die Erhöhung der Albedo mit Ausnahme der Ablagerung kohlenstoffhaltiger Aerosole (Ruß) auf Schneeflächen. Die letztgenannten Effekte veränderter Landnutzung sind gegenüber den vorangehend angeführten stärker regional bis lokal differenziert wirksam. Das gilt auch für die als geringfügig beurteilte Auswirkung von luftverkehrsinduzierter Cirrus-Bewölkung (Kondensstreifen) und für den bedeutsameren, aber mit erheblichen Unsicherheiten behafteten Aerosoleffekt, der in der direkten, durch die Rückwärtsstreuung der einfallenden Sonnenstrahlung bedingten Albedoerhöhung und der in gleichem Sinne wirksamen, noch unsichereren indirekten Wechselwirkung zwischen Aerosolen und Bewölkung besteht. Der gesamte anthropogene Strahlungsantrieb wird mit ca. 2,29 W/m² höher veranschlagt als im vorangegangenen vierten Sachstandsbericht (grüner Balken) für das Jahr 2005, muss aber mit einer Schwankungsbreite der Schätzungen von etwa 1,13 bis ca. 3,33 W/m² nach wie vor als verhältnismäßig unsicher gelten. Bemerkenswert ist sein markanter Anstieg in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts von 0,57 (0,29 bis 0,85) W/m² im Jahr 1950 über 1,25 (0,24 bis 1,86) W/m² für das Jahr 1980 auf ca. 2,3 W/m² für 2011, bezogen jedes Mal auf das Ausgangsjahr 1750 (IPCC 2013, p. 14).

Der sehr niedrige, mit hoher relativer Unsicherheit belastete Wert des solaren Antriebs bezieht sich auf die im Jahr 2011 gegenüber dem Bezugsjahr 1750 als nur unwesentlich verändert angenommene solare Energiezufuhr und enthält damit keine Aussage über die Rolle von Schwankungen der Sonnenstrahlung für den irdischen Klimawandel insgesamt, insbesondere über längere Zeiträume, in denen mit TSI-Werten zwischen 1360 und 1362 W/m² zu rechnen ist, was maximal möglichen Strahlungsantrieben von ca. +/- 0,5 W/m² entspräche. Allerdings entfallen im solaren Strahlungsenergiefluss bekanntlich nur etwa 47% auf den sichtbaren, 44% auf den infraroten und 9% auf den ultravioletten Spektralbereich, in dem im Rahmen des Sonnenfleckenzyklus prozentual wesentlich stärkere Intensitätsschwankungen auftreten, als sie für die Gesamtstrahlung charakteristisch. sind. Da aber die solare Ultraviolettstrahlung vor allem den Ablauf photochemisch-dynamischer Prozesse in der Stratosphäre nachhaltig beeinflusst, ist deren weitere Untersuchung und vervollkommnete Modellierung wie auch das Studium der Kopplungsmechanismen zwischen Tropo- und Stratosphäre Voraussetzung für die Aufklärung eines evtl. über den herkömmlichen gesamtenergetischen Forcing-Ansatz hinausgehenden Einflusses solarer Aktivitätsschwankungen auf die Klimaentwicklung in Vergangenheit und Zukunft.

Als Beispiel sei eine neue Untersuchung über die Ausbreitung von Veränderungen der zirkumpolaren Stratosphärenzirkulation in tiefere Atmosphärenschichten angeführt (Ivy et al. 2014). Immer wieder aufgefundene Zusammenhänge zwischen Sonnenfleckenrelativzahlen und atmosphärischen Zirkulationsmustern (z. B. Zhao und Wang 2014) sollten zu weiterer Suche nach Wirkungsmechanismen jenseits des Effektes der geringfügigen Schwankungen des totalen (über alle Wellenlängen integrierten) solaren Energieflusses Anlass geben.

Der im Zusammenhang mit dem Sonnenfleckenzyklus ins Spiel gebrachte Einfluss der solaren Modulation des Einfalls kosmischer Höhenstrahlung in die Atmosphäre und deren hypothetischer Effekt auf Kondensationskernproduktion und Wolkenbildung wird im Sachstandsbericht zwar erwähnt (p. 56), allerdings für unbedeutend gehalten, was u. E. weitere Untersuchungen nicht ausschließen sollte.

Entscheidend für die Auswirkungen des Strahlungsantriebs auf die Klimaentwicklung in Vergangenheit und Zukunft sind die durch Temperaturänderungen ausgelösten Rückkoppelungseffekte z. B. im Wasser- und Kohlenstoffkreislauf, die in den verschiedenen Vergleichen komplexer Klimamodelle (*Coupled Model Intercomparison Projects, CMIPs*) Berücksichtigung finden. Den bekannten positiven Rückkoppelungen (Albedoverminderung infolge Rückgangs der Schnee- und Eisbedeckung und Zunahme des strahlungswirksamsten Treibhausgases Wasserdampf in der Atmosphäre im Falle ansteigender Temperaturen)⁷ stehen unzureichend bekannte bzw. verstandene Rückkoppelungen beispielsweise im Bewölkungsregime, vor allem aber im Kohlenstoff- und Methankreislauf gegenüber (verändertes Aufnahmevermögen des Ozeans und der Biosphäre für CO₂, Ausdehnung und CH₄-Emission von Feuchtgebieten und evtl. Freisetzung von Kohlendioxid- und Methanvorräten aus Permafrostböden oder Hydratlagerstätten in einem veränderten Klimaregime u. a. m.).

Als Maß zur Kennzeichnung der Auswirkungen des Strahlungsantriebes auf das globale Temperaturregime wird seit Jahrzehnten die Klimasensitivität (climate sensitivity) verwendet und vielfach diskutiert. Als Gleichgewichtssensitivität (equilibrium sensitivity) wird die einer angenommenen Verdoppelung der atmosphärischen CO₂-Konzentration folgende Erhöhung der globalen Mitteltemperatur an der Erdoberfläche bis zum Eintritt eines neuen (Strahlungs)Gleichgewichtszustandes bezeichnet, als transiente Klimasensitivität (transient climate response) der Anstieg der globalen Mitteltemperatur an der Erdoberfläche im Falle einer Verdoppelung der CO₂-Konzentration mit einer linearen Zunahme des CO₂-Strahlungsantriebes über einen Zeitraum von 70 Jahren. Beide Maßzahlen können aus Beobachtungen und/oder Modellrechnungen bzw. einer Kombination beider bestimmt werden. Nach dem fünften Sachstandsbericht soll die Gleichgewichtssensitivität mit *high confidence likely* im

⁷ Der für das globale Klima bedeutsame Zusammenhang zwischen Lufttemperatur und -wasserdampfgehalt begründet eine für den Klimawandel wesentliche positive systeminterne Rückkoppelung im Klimasystem. Der Wasserdampf erscheint daher nicht in der Aufstellung der externen Strahlungsantriebe; der mit ihm verbundene Rückkoppelungseffekt geht vielmehr in die Bestimmung der Klimasensitivität ein.

Bereich von 1,5 bis 4,5 K liegen, die transiente *likely* im Bereich von 1 bis 2,5 K, ebenfalls mit *high confidence.* (vgl. IPCC 2013 pp. 83-84 mit Wiedergabe von Wahrscheinlichkeitsverteilungen der Schätzwerte für die Gleichgewichts- und die transiente Klimasensitivität).

Natürlich widerspiegelt die Klimasensitivität, die sich ja allein auf das Verhalten der globalen Mitteltemperatur an der Erdoberfläche bezieht, nur die Gesamtheit aller an die verschiedenen Komponenten des Strahlungsantriebes geknüpften, regional und zeitlich variablen sowie auch vom Zeitmaßstab der ablaufenden Veränderungen abhängigen, positiven oder negativen Rückkoppelungseffekte. Es stellt sich nun die Frage, welchen Anteil der – wesentlich anthropogen geprägte – Strahlungsantrieb gegenüber den eingangs erwähnten systeminternen Schwankungen, die auch als "natural variability" "unforced climate variations" oder ähnlich bezeichnet werden, an den gegenwärtigen Veränderungen im Klimasystem der Erde hat. Vom Effekt zunehmender Treibhausgaskonzentration zeugt deren typische "footprint" – der in den Beobachtungen nachweisbare Temperaturanstieg in der Tropo- bei gleichzeitiger Abkühlung in der Stratosphäre (neueste Daten bei Long, Christy 2104).

Für die Rolle speziell der anthropogenen Faktoren insgesamt spricht der schon in früheren Sachstandsberichten vermerkte und im fünften Bericht bestätigte Umstand, dass Simulationsexperimente zur Nachbildung des beobachteten Temperaturverlaufs im 20. und zu Beginn des 21. Jahrhunderts nur bei Berücksichtigung natürlicher und anthropogener Antriebe eine befriedigende Übereinstimmung mit den Beobachtungen ergeben, wohingegen die alleinige Berücksichtigung natürlicher Antriebe insbesondere den Temperaturanstieg in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts nicht adäquat wiedergibt. Im neuesten Sachstandsbericht wurden entsprechende Vergleiche stärker regionalisiert und auf weitere Parameter – Wärmeinhalt der Ozeane und polare Meereisbedeckung – ausgedehnt, im Prinzip mit gleichem Ergebnis (Abb. 10). Nur im Falle des Wärmeinhaltes im südatlantischen, im südpazifischen und im indischen Ozean sowie der Lufttemperatur in der Antarktis liegt der beobachtete Verlauf der betreffenden Parameter im Übergangsbereich zwischen den Simulationsexperimenten mit und ohne anthropogenen Antrieb.

Auf ganz andere Weise haben bereits Schönwiese et al. 2010 unter Verzicht auf jegliche Modellannahmen oder -simulationen allein unter Anwendung statistischer Verfahren, wie multipler linearer Regressionen und nichtlinearer neuronaler Netzwerke, auf den beobachteten globalen Temperaturverlauf im Zeitraum von 1860 bis 2008 den Einfluss natürlicher und anthropogener Faktoren wie auch der ENSO-Oszillationen untersucht (Abb. 11). Es zeigt sich, dass der u. a. durch markante Vulkanausbrüche (zuletzt El Chicon 1982 und Pinatubo 1991) und El Niño -Ereignisse geprägte Gang der globalen Temperaturanomalien (Abweichung gegenüber dem Zeitraum 1961-1990) (dicke schwarze Kurve) durch ein backpropagation network gut wiedergegeben wird (dünne schwarze Kurve). Die von kurzperiodischen Schwankungen freie graue Kurve resultiert aus einer Netzwerksimulation des gemeinsamen Einflusses der anthropogenen Treibhausgas- und Sulfataerosolemission, die jede für sich unrealistische Temperaturverläufe liefern würden (gestrichelte Kurven).

In Tab. 1 sind nach der gleichen Quelle Antriebe⁸ und Temperatureffekte von anthropogener Treibhausgas- und Sulfatemission, von solaren Variationen, Vulkaneruptionen und El Niño-Ereignissen aufgelistet, die zusammen ca. 80% oder mehr der Gesamtvarianz erklären. Die Ergebnisse entsprechen der im fünften Sachstandsbericht getroffenen Feststellung, dass mehr als die Hälfte des Anstiegs der globalen Mitteltemperatur im Zeitraum von 1951 bis 2010 *very likely* der beobachteten anthropogenen Zunahme der anthropogenen Treibhausgaskonzentration zuzuschreiben ist (IPCC 2013, p.66).⁹

Überlagert und modifiziert werden die unter dem Einfluss des Strahlungsantriebes im Bereich von Jahrzehnten oder – z. B. als Reaktion auf kurzfristig wirksame Vulkanstaubtrübungen auch in kürzeren Zeiträumen – ablaufenden Klimaänderungen durch die genannten internen Schwankungen, z. B. im System Ozean/Atmosphäre. Hier existieren neben dem schon erwähnten ENSO (El Niño/Southern

⁸ Die Strahlungsantriebe beziehen sich auf den Zeitraum von 1750 bis 2005 und wurden dem IPCC-Bericht AR4, IPCC 2007 entnommen.

⁹ Es bleibt festzuhalten, dass im IPCC-Bericht damit nichts die gesamte globale Erwärmung der letzten Jahrzehnte auf die anthropogene Zunahme der Treibhausgaskonzentration zurückgeführt wird.

Oscillation) mit weltweiten Auswirkungen auf die atmosphärische Zirkulation noch weitere Oszillationen, so im Raum des atlantischen, des pazifischen und des indischen Ozeans sowie der Polargebiete (vgl. Woods Hole Oceanographic Institution). Von besonderer Bedeutung für das Witterungsgeschehen in der europäisch-atlantischen Region ist die nordatlantische Oszillation (NAO) der Luftdruckdifferenz zwischen subtropischen und polaren Breiten (repräsentiert etwa durch Azorenhoch und Islandtief), wie wir am Beispiel des Wetters um die Jahreswende 2010/2011 demonstriert haben (Bernhardt 2012a). Dabei wurde auch der aus Klimasimulationsexperimenten erschlossene Einfluss einer solchen Begleiterscheinung des globalen Klimawandels, wie des Rückgangs der nordpolaren Meereisbedeckung, auf scheinbar gegenläufige Witterungsabläufe mit strengen Wintern in Mittelund Osteuropa (Petoukhov und Semenov 2009) erwähnt. Dieses Beispiel steht zugleich für Auswirkungen der durch (natürliche und anthropogene) Strahlungsantriebe bewirkten Veränderungen im globalen Klimasystem auf systeminterne Schwankungen und deren Folgen im regionalen Bereich. Gleiches dürfte auch für ENSO gelten, wenngleich dessen Veränderungen im gegenwärtigen und künftigen globalen Klimawandel noch strittig sind.

Ebeling und Lanius 2000, Ortiz-Tañchez et al. 2002 und Ebeling 2014 mit weiteren Literaturhinweisen, (vgl. insbesondere Feistel, Ebeling 2011) haben das El Niño-Phänomen mit Mitteln der Stochastik- und Chaostheorie untersucht und bemerkt, dass für dessen Vorhersage sowohl physikalisch-deterministische als auch statistische Modelle verwendet werden. Interne Schwankungen, die im Rahmen globalen Klimawandels zufällig erscheinen, können in anderem Zusammenhang und in anderen Scalebereichen durchaus determiniert sein. Dies ist von großer Bedeutung für die Witterungsvorhersage auf Monate bis Jahre bzw. ein Jahrzehnt im voraus, eine der großen Herausforderungen der heutigen Meteorologie. Von den jüngsten, volkswirtschaftlich folgenschweren Witterungsanomalien der Jahre 2013/2014 wurden beispielsweise weder der sehr kalte Winter in Nordamerika, noch der sehr milde, nasse und stürmische Winter in Europa – beides Ausdruck von markanten troposphärischen Zirkulationsmustern – auf Monatsbasis rechzeitig und zutreffend vorhergesagt, wie man der Rückschau von Wehry 2014a, b entnehmen kann. Monats- und Jahres- bis Dekadenprognosen betreffen einen Vorhersagezeitraum, in dem sich der Übergang von anfangswertbestimmten Wetterablauf zu von variablen Randbedingungen determinierten Klimaphänomenen vollzieht.

Auf jeden Fall wird der Klimawandel vom Zusammenwirken des (natürlichen und anthropogenen) Strahlungsantriebs als fundamentalem energetischem Faktor mit vielfältigen systeminternen Schwankungen bestimmt, die simultan betrachtet werden müssen und nicht gegeneinander gestellt werden dürfen.¹⁰ Das gilt auch für die Erklärung des "Hiatus", worunter im Sachstandsbericht eine Verlangsamung des globalen Temperaturanstiegs – für den Zeitraum 1998-2012 beispielsweise auf ein Drittel bis auf die Hälfte des Trends über die Jahre 1951-2012 – verstanden wird. Obgleich in Simulationsexperimenten – allerdings mit geringer Häufigkeit – auch 15jährige Hiatusperioden als Ausdruck einer "internal climate variability" auftreten (vgl. hierzu auch v. Storch 2013), wird im vorliegenden Bericht nach gründlicher Diskussion ein Zusammenspiel von interner Variabilität und reduziertem Strahlungsantrieb nach kleineren Vulkanausbrüchen und bei vermindertem solarem Strahlungsfluss im letzten Sonnenfleckenzyklus (Minimum im Jahr 2008) angenommen (IPCC 2013, pp. 61-63). Auch eine Überschätzung des anthropogenen Strahlungsantriebes und vor allem seiner weiter oben postulierten Zunahme seit dem Jahr 1950 ist nicht auszuschließen. Hinzu kommen möglicherweise eine in den Simulationsexperimenten nicht berücksichtigte Abnahme stratosphärischen Wasserdampfgehaltes, die lang anhaltende La Niña- bzw. neutrale Periode im ENSO-Zyklus im Anschluss an das sehr intensive El Niño-Ereignis des Jahres 1998, vor allem aber eine erhöhte Wärmeaufnahme durch den Ozean einschließlich eines verstärkten Wärmetransportes in tiefere Schichten (Meehl et al. 2011), letzteres z. B. im Zusammenhang mit Schwankungen der Passatwinde im Rahmen der Decadal Pacific Oscillation (PDO, vgl. Trenberth 2013, Trenberth, Fasullo 2013).

¹⁰ Um dies am Würfelbeispiel zu verdeutlichen: Dass für die zufällige Folge geworfener Augenzahlen nur statistische Aussagen möglich sind, ändert nichts an der Tatsache, dass ein Würfel mit anderer Massenverteilung eine Folge von Augenzahlen mit anderen statistischen Charakteristiken liefert.

Die Wärmespeicherung im Ozean, der der Größenordnung nach bedeutendste Posten in der gegenwärtigen globalen Energieimbalance als der Differenz zwischen Strahlungszu- und abfluss an der Atmosphärenobergrenze, wird in jüngster Zeit intensiv untersucht (z. B. Balmesada et al. 2013, Chen und Tung 2014, Palmer et al. 2014). Für der Wärmeübergang zwischen Ozean und Atmosphäre und den Wärmefluss in tiefere Schichten spielen offensichtlich neben den atmosphärischen und ozeanischen Strömungen die Temperatur- und Salzgehaltsschichtung eine entscheidende Rolle, was einen bedeutsamen Einfluss der weiter oben erwähnten ozeanisch-atmosphärischen Oszillationen und weiterer systeminterner Schwankungen auf die Verteilung des derzeitigen "global heating" zwischen Atmo- und Hydrosphäre begründet, der angesichts der im Abschnitt 3 umrissenen Schmelzprozesse auch die Kryosphäre betrifft. Dies ist nur ein Beispiel für die weiter oben betonte Wechselwirkung von externem Antrieb und interner ("natürlicher") Variabilität, die unbedingt beachtet werden muss, sollen fundierte Aussagen über den Klimawandel und seinen voraussichtlichen weiteren Verlauf getroffen werden!

Tabelle 1: Natürliche und anthropogene Strahlungsantriebe im Jahr 2005 Jahr gegenüber 1750 sowie extreme Werte aus den Jahren 1860 – 2008 im Vergleich mit Ergebnissen multipler linearer Regressionen und neuronaler Netze nach Schönwiese et al. 2010, S. 6.

Table 3: Radiative forcing RF 1750–2005 (IPCC, 2007) in comparison with the maximum signals in the global mean surface air temperature 1860–2008 time series due to the specified forcing factors where MLR refers to multiple linear regression and NN1 or NN2, respectively, are the neural network backpropagation simulations as described in the text. For forcing abbreviations see Table 1. EV specifies the total explained variance. *) Leading value from MCCORMICK et al. (1995) in case of Mt Pinatubo eruption (1991), range from GRIESER and SCHÖNWIESE (1999) for all VEI > 4 eruptions within 1860–2008. **) Due to strong GHG-SUL correlation MLR is not able do discern between GHG and SUL signals properly.

Forcing	RF	MLR	NN1	NN2
GHG	$+ 3.0 (2.7 - 3.6) \text{ Wm}^{-2}$	-**)	+ 0.88 K	+ 1.46 K
SUL	$-1.2 (0.4-2.7) \text{ Wm}^{-2}$	-**)	-0.18 K	-0.51 K
GHG+SUL	$[+1.8 \text{ Wm}^{-2}]$	+ 0.70 K	+ 0.73 K	+ 0.86 K
SOL	+0.1 (0.06-0.3)Wm ⁻²	+ 0.15 K	+ 0.20 K	+ 0.05 K
VOL	$-3.2 (0.1-6.7) \text{ Wm}^{-2*}$	-0.23 K	-0.24 K	-0.24 K
ENSO	-	+ 0.26 K	+ 0.15 K	+ 0.18 K
Total EV		80 %	76 %	88 %

5. Pfade in die Klimazukunft

Wurde noch in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts die Wettervorhersage in der Öffentlichkeit als Haupt-, wenn nicht sogar als einzige Aufgabe der Meteorologie angesehen und diese fälschlich auf Wetterkunde reduziert, so werden heute vordringlich Aussagen über die künftige Klimaentwicklung erwartet. Wettervorhersage soll ankündigen, was (in der Atmosphäre) sein wird, Klimavorschau, was (im Klimasystem) sein kann. Klima"prognose" kann nur Wahrscheinlichkeitsaussagen enthalten bzw. Projektionen möglicher Entwicklungen umfassen. Letztere werden von systeminternen Schwankungen, vor allem aber von Veränderungen in allen Komponenten des Klimasystems einschließlich der solaren Wellen- und Partikelstrahlung einerseits und gesellschaftlichen Aktivitäten, wie Landnutzung und Energieerzeugung andererseits, bestimmt. Klimaprojektionen schließen damit Szenarien unterschiedlichen ökonomischen Wachstums, sozialer Differenzierung, fossiler und nichtfossiler Energienutzung sowie der Technologienentwicklung ein. Vorangegangene IPCC-Berichte haben im Anschluss an einen Special Report on Emission Scenarios die SRES-Szenarien A1, A2, B1, B2 und weitere Untertypen als Grundlage für die Abschätzung künftigen CO₂-Ausstoßes und der damit verbundenen Klimaänderungen benutzt (z. B. IPCC 2007, ,p. 12ff., vgl. auch Lanius 2009, S. 33).

Eine anderer Weg für Klimaprojektionen wird im fünften Sachstandsbericht mit der Vorgabe von repräsentativen Konzentrationspfaden (Representative Concentration Pathways) gewählt, die von ihrem Ende her – dem für das Jahr 2011 angestrebten bzw. tolerierten Strahlungsantrieb – definiert und benannt sind, für den 2,6, 4,5, 6.0 und 8,5 W/m² angesetzt werden. Im Rahmen der genannten

Szenarien können auch sozialökonomische, energiewirtschaftliche und Maßnahmen der Klimapolitik in die Simulationsexperimente einbezogen werden. Das Szenario 2,6 beispielsweise ist ohne wirksame Emissionsminderung nicht denkbar.

Als Beispiel für Konzentrationspfade zeigt die folgende Tabelle 2 einen breiten Bereich möglicher kumulativer CO_2 -Emissionen¹¹ im Zeitraum von 2012 bis 2100, die im Rahmen von Klimamodellsimulationen mit den verschiedenen Szenarien vereinbar sind. Das Szenario in der ersten Zeile entspricht dabei einem Strahlungsantrieb, der im Jahr 2100 mit 2,6 W/m² nur unwesentlich über dem weiter oben angeführten anthropogenen Strahlungsantrieb von ca. 2,3 W/m² für das Jahr 2011 liegen würde. Der im Rahmen der gewählten Pfade nach unterschiedlichen Simulationen bis Ende des Jahrhunderts zu erwartende Anstieg der globalen Mitteltemperatur und des Meeresspiegels wird in Tab. 3 aufgeführt. Beobachtete und simulierte Werte der globalen Mitteltemperatur, der nordhemisphärischen Meereisbedeckung im Monat September und des pH-Wertes an der Meeresoberfläche sind in Abb. 12 graphisch dargestellt, ebenso wie der globale Meeresspiegelanstieg noch einmal in Abb. 13. Danach liegt die mit den Zielwerten des Strahlungsantriebs kompatible Erhöhung des Meeresspiegels nach Modellrechnungen also unter 30 cm im günstigsten und nahezu über einem Meter im ungünstigsten Fall. Für das RCP2.6-Szenario könnten sich CO_2 -Emission und globaler Temperaturanstieg zumindest bis zum Jahr 2050 annähernd linear fortsetzen, wie Abb.14 erkennen lässt. Für andere Szenarien sind Temperaturerhöhungen bis Ende des 21. Jahrhunderts um bis zu 5 K möglich.

Tabelle 2: Mögliche kumulative CO₂-Emissionen im Zeitraum von 2012 bis 2100 für unterschiedliche repräsentative Konzentrationspfade nach IPCC 2013, Table SPM.3, p. 27.

Scenario	Cumulative CO ₂ Emissions 2012 to 2100 ^a					
	(StC	GtCO ₂			
	Mean	Range	Mean	Range		
RCP2.6	270	140 to 410	990	510 to 1505		
RCP4.5	780	595 to 1005	2860	2180 to 3690		
RCP6.0	1060	840 to 1250	3885	3080 to 4585		
RCP8.5	1685	1415 to 1910	6180	5185 to 7005		

Table SPM.3 Cumulative CO₂ emissions for the 2012 to 2100 period compatible with the RCP atmospheric concentrations simulated by the CMIP5 Earth System Models. {6.4, Table 6.12, Figure TS.19}

Notes:

^a 1 Gigatonne of carbon = 1 GtC = 10^{15} grams of carbon. This corresponds to 3.667 GtCO₂.

Fortgesetzte Emission auf dem 8.5-Pfad über das Jahr 2100 hinaus könnte für 2300 einen Strahlungsantrieb von über 12 W/m² und für den Zeitraum von 2281 bis 2300 einen globalen Temperaturanstieg um 7,8 (3,0 bis 12,0) K gegenüber der Epoche 1986 bis 2005 mit sich bringen, eine auf dem 2,6-Pfad weiter verlaufende Trajektorie über stagnierende bzw. "negative" Emission (Rückführung von CO_2 aus der Atmosphäre) einen Rückgang des Strahlungsantriebs unter den heutigen Wert nach dem Jahr 2300 mit einer globalen Erwärmung von nur noch 0,6 (0,0 bis 1,2) K. Generell würde die CO_2 bedingte Temperaturerhöhung aber auch bei völligem Versiegen der Emission über mehrere Jahrhunderte annähernd konstant fortbestehen! (IPCC 2013, p. 102ff.)

Für fernere Zeithorizonte ist auch die Möglichkeit abrupter Klimaänderungen¹² in Betracht zu ziehen, so im Zusammenhang mit Änderungen der Atlantic Meridional Overturning Circulation (AMOC),

¹¹ Beim Vergleich dieser CO₂-Emissionen mit den Angaben zu Kohlenstoffübergängen in Abschnitt 3 ist zu beachten, dass sich die molaren Massen von Kohlendioxid und Kohlenstoff (CO₂ und C) um den Faktor 3,667 voneinander unterscheiden.

¹² Abrupte Klimaänderungen sind laut Definition großräumige Veränderungen im Klimasystem, die über einen Zeitraum von einigen Jahrzehnten oder darunter eintreten, für mindestens einige Jahrzehnte anhalten und beträchtliche Störungen (*substantial disruptions*) in gesellschaftlichen und natürlichen Systemen verursachen (IPCC 2013, p. 70).

einer thermohalinen Zirkulation deren kurzfristige markante Abschwächung infolge Süßwasserzufuhr mit nachfolgender rascher Erholung binnen zweier Jahrhunderte bekanntlich deutliche Spuren im

Tabelle 3: Projektionen von Veränderungen der globalen Mitteltemperatur an der Erdoberfläche und des Meeresspiegelanstiegs bis zur Mitte bzw. zum Ende des 21. Jahrhunderts für unterschiedliche repräsentative Konzentrationspfade nach IPCC 2013, Table SPM.2, p.23.

 Table SPM.2 |
 Projected change in global mean surface air temperature and global mean sea level rise for the mid- and late 21st century relative to the reference period of 1986–2005. {12.4; Table 12.2, Table 13.5}

		2	2046-2065		2081-2100	
	Scenario	Mean	Likely range ^c	Mean	Likely range ^c	
Global Mean Surface Temperature Change (°C)ª	RCP2.6	1.0	0.4 to 1.6	1.0	0.3 to 1.7	
	RCP4.5	1.4	0.9 to 2.0	1.8	1.1 to 2.6	
	RCP6.0	1.3	0.8 to 1.8	2.2	1.4 to 3.1	
	RCP8.5	2.0	1.4 to 2.6	3.7	2.6 to 4.8	
	Scenario	Mean	Likely range ^d	Mean	Likely range ^d	
	RCP2.6	0.24	0.17 to 0.32	0.40	0.26 to 0.55	
Global Mean Sea Level	RCP4.5	0.26	0.19 to 0.33	0.47	0.32 to 0.63	
Rise (m) ^b	RCP6.0	0.25	0.18 to 0.32	0.48	0.33 to 0.63	
	RCP8.5	0.30	0.22 to 0.38	0.63	0.45 to 0.82	

Notes:

^b Based on 21 CMIP5 models; anomalies calculated with respect to 1986–2005. Where CMIP5 results were not available for a particular AOGCM and scenario, they were estimated as explained in Chapter 13, Table 13.5. The contributions from ice sheet rapid dynamical change and anthropogenic land water storage are treated as having uniform probability distributions, and as largely independent of scenario. This treatment does not imply that the contributions concerned will not depend on the scenario followed, only that the current state of knowledge does not permit a quantitative assessment of the dependence. Based on current understanding, only the collapse of marine-based sectors of the Antarctic ice sheet, if initiated, could cause global mean sea level to rise substantially above the *likely* range during the 21st century. There is *medium confidence* that this additional contribution would not exceed several tenths of a meter of sea level rise during the 21st century.

^c Calculated from projections as 5–95% model ranges. These ranges are then assessed to be *likely* ranges after accounting for additional uncertainties or different levels of confidence in models. For projections of global mean surface temperature change in 2046–2065 *confidence* is *medium*, because the relative importance of natural internal variability, and uncertainty in non-greenhouse gas forcing and response, are larger than for 2081–2100. The *likely* ranges for 2046–2065 do not take into account the possible influence of factors that lead to the assessed range for near-term (2016–2035) global mean surface temperature change that is lower than the 5–95% model range, because the influence of these factors on longer term projections has not been quantified due to insufficient scientific understanding. {11.3}

^d Calculated from projections as 5–95% model ranges. These ranges are then assessed to be *likely* ranges after accounting for additional uncertainties or different levels of confidence in models. For projections of global mean sea level rise *confidence* is *medium* for both time horizons.

postglazialen Temperaturverlauf hinterlassen hat. Nach Modellrechnungen im Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 (CMIP5) wird sich die AMOC im Lauf des 21. Jahrhunderts *very likely* abschwächen, auf dem Klimapfad RCP2.6 um 11 (1 bis 24)%, auf RCP8.5 dagegen um 34 (12 bis 54)%, während ein abrupter Zusammenbruch in diesem Jahrhundert mit *high confidence* als *very unlike* gilt, für spätere Zeit aber bei fortgesetzter Klimaerwärmung nicht ausgeschlossen werden kann (IPCC 2013, p. 70f.)

Weitere mögliche Ursachen abrupter Klimaänderungen, die auch irreversibel in dem Sinne sein können, das die Rückkehrzeit im Gefolge natürlicher Prozesse wesentlich größer ist als die Zeit, die das betrachtete System bis zum Eintreten der Störung durchlaufen hat, liegen im Verhalten der Permafrostböden (Kohlendioxid- und Methanspeicher), der Methanhydrate und dem "dieback" tropischer und borealer Wälder begründet. Diskutiert werden schließlich das Verhalten der Eisschilde der Ost- und Westantarktis und besonders Grönlands im Zeitbereich eines Jahrtausends, der Rückgang

^a Based on the CMIP5 ensemble; anomalies calculated with respect to 1986–2005. Using HadCRUT4 and its uncertainty estimate (5–95% confidence interval), the observed warming to the reference period 1986–2005 is 0.61 [0.55 to 0.67] °C from 1850–1900, and 0.11 [0.09 to 0.13] °C from 1980–1999, the reference period for projections used in AR4. *Likely* ranges have not been assessed here with respect to earlier reference periods because methods are not generally available in the literature for combining the uncertainties in models and observations. Adding projected and observed changes does not account for potential effects of model biases compared to observations, and for natural internal variability during the observational reference period [2.4; 11.2; Tables 12.2 and 12.3]

der sommerlichen Meereisbedeckung im Nordpolargebiet sowie lang anhaltende Trockenperioden und Modifikationen der Monsunzirkulation.

Für den Zeitbereich der nächsten Jahre und Jahrzehnte interessieren neben dem Verhalten der Mittelwerte, so im Falle der globalen Mitteltemperatur ihr erwarteter weitere Anstieg, Veränderungen der atmosphärischen Zirkulationssysteme und besonders Andauer, Häufigkeit und geographische Verteilung extremer Witterungsereignisse. In Fortsetzung bestehender Trends (seit 1950) werden für das frühe und das späte 21. Jahrhundert eine erhöhte Anzahl warmer Tage/Nächte bei verringerter Anzahl kalter Tage/Nächte über den meisten Festlandsgebieten erwartet, desgleichen erhöhte Häufigkeit und Andauer von Hitzewellen. Häufigkeit und Intensität von Starkniederschlagsereignissen werden über größeren Landgebieten zu-, über kleineren auch abnehmen, so wie Intensität und/oder Länge von Trockenperioden, *likely* in vielen Regionen bereits seit 1970. Die Intensität – nicht die Anzahl – tropischer Zyklonen werde zunehmen, allerdings mit *low confidence*, und *likely* auch Häufigkeit und/oder Betrag von extremen Hochwasserständen (IPCC 2013, 109f.).

Erhöhte Häufigkeit und/oder Intensität extremer Wetterereignisse sowie längere Andauer entsprechender Wetterlagen bzw. Zirkulationsformen würden die Gesellschaft in Zukunft stärker belasten und aufwendigere Anpassungs- und Gegenmaßnahmen erfordern als ein weiterer Anstieg der globalen Mitteltemperatur an der Erdoberfläche allein. Sollten sich allerdings die gegenwärtigen Angaben über die positive Strahlungsimbalance an der Atmosphärenobergrenze und die erhöhte Wärmeaufnahme des Ozeans bestätigen bzw. fortschreiben lassen, wäre für die Klimazukunft einer weiteren, bisher kaum beachteten Zeitbombe höchste Aufmerksamkeit zu widmen.

Literatur

Anthropocene: An epoch of our making. Global Change 78, March (2012), 12-15.

- Balmeseda, M. A., Trenberth, K. E., Källén, E.: Distinctive signals in reanalysis of global heat content. Geophys. Res. Letters 40, 16 Aug. 2013, 1754-1759.
- Baur, F.: Abweichungen der Monatsmittel der Temperatur Mitteleuropas vom 210jährigen Mittelwert (1761-1970) in °C. Beilage zur Berliner Wetterkarte 76/75, SO 19/75, 24. 6. 1975, 6 S., laufend fortgesetzt in der Berliner Wetterkarte.
- Bennartz, R., Shupe, M. D., Turner, D. D., Walden, V. P., Steffen, K., Cox, C. J., Kulie, M. S., Miller, N. B., Pettersen, C.: July 2012 Greenland melt extent enhanced by low-level liquid clouds. Nature 496 (04 April 2013), 83-86. doi: 1038/nature12002.
- Bernhardt, K.: Aufgaben der Klimadiagnostik in der Klimaforschung. Gerl. Beitr. zur Geophys. 96(1987), 113-126.
- Bernhardt, K.: Alexander von Humboldts Beitrag zu Entwicklung und Institutionalisierung von Meteorologie und Klimatologie im 19. Jahrhundert. Algorismus 41(2003), 195-221.

Bernhardt, K.: Dialektik des Klimas. Sitz. Ber. d. Leibniz-Soz. d. Wiss. 102(2009), 111-157.

Bernhardt, K.: Klima im Wandel (2012a).

http://www.leibniz-institut.de/archiv/bernhardt_01_02_12.pdf

- Bernhardt, K.: Nuklearer Winter Einwirkungen eines massierten Kernwaffeneinsatzes auf das Klimasystem. Abh. d. Leibniz-Soz. d. Wiss. 32(2012b), 199-214.
- Bernhardt, K.: Johann Wolfgang von Goethe Poet, Naturforscher und Witterungschronist am Ausgang der Kleinen Eiszeit. Annal. d. Meteorol. 46(2013a), 8-11.
- Bernhardt, K.: Energiewende im Klimawandel. Abh. d. Leibniz-Soz. d. Wiss. 31(2013b), 125-132.
- Bernhardt, K., Mäder, C.: Statistische Auswertung von Berichten über bemerkenswerte Witterungsereignisse seit dem Jahre 1000. Z. Meteorol. 37(1987), 120-130.
- Chen, Xianyao, Tung, Ka-Kit: Varying planetary heat sink led to global-warming slowdown and acceleration. Science 22 August 2014, Vol. 345 no 6199, 897-903. DOI: 10.1126/science. 1254937.

- Cohen, J., Screen, J. A., Furtado, J. C., Barlow, M., Whittleston, D., Coumu, D., Francis, J., Dethloff, K., Entekhabi, D., Overland, J., Jones, J.: Recent Arctic amplification and extreme mid-latitude weather. Nature geoscience, 17 August 2014, DOI: 10.1038/NGE02234, 627-637.
- Comou, D, Petoukhov, V., Rahmstorf, S., Petri, P., Schellnhuber, H. J.: Quasi-resonant circulation regimes and hemispheric synchronisation of extreme weather in boreal summer. PNAS 111(2014), no. 34, 12331-12336. doi: 10.1073/pnas.1412797111.
- Ebeling, W.: Über das Gedächtnis des Zufalls. Sitz. Ber. d. Leibniz-Soz. d. Wiss. zu Berlin 118(2014), 71-78.
- Ebeling, W., Lanius, K.: Zur Vorhersagbarkeit komplexer Prozesse. Sitz. Ber. d. Leibniz-Soz. 42(2000), 5-26.
- Feistel, R., Ebeling, W.: Physics of Self-Organization and Evolution. Wiley 2011.
- Glaser, R.: Klimageschichte Mitteleuropas. Darmstadt (2001), 227 S.
- Helm, V., Humbert, A., Miller, H.: Elevation and elevation change of Greenland and Antarctica derived from CryoSat-2. The Cryosphere 8(2014), 1539-1559. <u>www.the-</u> <u>cryosphere.net/8/1539/2014/</u> doi:10.5194/tc-8-1539-2014.
- Hupfer, P. (Hrsg.): Das Klimasystem der Erde. Akademie Verlag, Berlin (1991), 464 S.
- Ivy, D. J., Solomon, S., Thompson, D. W. J.: On the identification of the downward propagation of arctic stratospheric climate change over recent decades. J. of Climate 27(2014), 2789-2818.
- IPCC, 2007: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Working Group I Contribution to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge Univ. Press, Cambridge, UK, and New York, USA, 996 pp.
- IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Working Group I Contribution 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. Migley (eds.)]. Cambridge Univ. Press, Cambridge, UK, and New York, USA, 1535 pp.
- Kratz, D. P., Stackhouse, P. W., Jr., Wong, T., Sawaengphokai, P., Willer, A. C., Gupta, S. K., Loeb, N. G.: Earth radiation budget. Bull. Amer. Meteorol. Soc. 95(2014) No. 7, Special Supplement, State of the climate in 2013, July 2014, 30-32.
- Krossin, J. P., Emanuel, K. A., Vecchi, G. A.: The poleward migration of the location of tropical cyclone maximum intensity. Nature 509, 15 May 2014, 349-352.
- Lamb, H. H.: Klima und Kulturgeschichte. Hamburg (1994), 448 S.
- Lanius, K.: Wieviel Geschichte braucht die Zukunft? Sitz. Ber. d. Leibniz-Soz. d. Wiss. 102(2009), 7-43.
- Long, C. S., Christy, J.: Lower stratospheric temperature. Bull. Amer. Meteorol. Soc. 95(2014) No. 7, Special Supplement, State of the climate in 2013, July 2014, 14.
- Malberg, H.: Über den globalen Erwärmungsstillstand seit 1998. Beiträge zur Berliner Wetterkarte SO 03/14, 2014, 6 S.
- Meehl, G. A., Arblaster, J. M., Fasullo, J. T., Hu, A., Trenberth, K.: Model-based evidence of deepocean heat uptake during surface-temperature hiatus periods. Nature Climate Change 1(2011), 360-364.
- Ortiz-Tanchez, E., Ebeling, W., Lanius, K.: MEI, SOI and mid-range correlations in the onset of El Niño-Southern Oscillation. Physica A 310(2002), 509-520.
- Petoukhov, V., Semenov, V. A.: A link between reduced Barents-Kara sea ice and cold-winter extremes over northern continents. J. Geophys. Res. – Atmospheres 115: D21111 DOI 10.1029/2009JD013568, 11pp.
- Palmer, M., Balmaseda, M., Chang, Y.-S., Chepurin, G., Fujii, Y., Good, S., Guinehut, S., Hernandez, F., Martin, M., Masuda, S., Peterson, K. A., Toyoda, T., Valdivieso, M., Vernieres, G., Wang, O., Xue, Y.: CLIVAR-GSOP/GODAE intercomparison of ocean heat content: initial results. CLIVAR Exchanges No. 64, (Vol. 19 No 1) February (2014), 8-10.

- Pollack, H. N., Hunter, S. J., Johnston, J. R.: Heat loss from the earth's interior: analysis of the global data set. Rev. Geophys. 31(1993), 67-280.
- Sasgen, I., Konrad, H., Ivins, E. R., Van den Broeke, M. R., Bamber, J. L., Martinec, K., Kleman, V.: Antartic ice-mass balance 2003-2012: regional reanalysis of GRACE satellite gravimetry measurements with improved estimate of glacial-isostatic adjustment based on GPS uplift rates. The Cryosphere 7(2013), 1499-1512. www.the-cryosphere.net/7/1499/2013.
- Schönwiese, C.-D., Walter, A., Brinckmann, A.: Statistical assessment of anthropogenic and natural global climate forcing. An update. Meteorol. Z. 19(2010), 3-10. <u>www.schweizerbart.de/journals/metz</u>
- Spänkuch, D.: Fernerkundung der Erde Hiobsbotschaften aus dem All. Sitz. Ber. d. Leibniz-Soz. d. Wiss. 96(2008), 63-73.
- Storch, H v.: Wir stehen vor einem Rätsel. Der Spiegel vom 17. 06. 2013.
- Tedesco, M., Fettweis, X., Mote, T., Wahr, J., Alexander, P., Box, J. E., Wouters, B.: Evidence and analysis of 2012 Greenland records from spaceborne observations, a regional climate model and reanalysis data. The cryosphre 7(2013), 615-630. doi: 10.5194/tc-7-615-2013.
- Trenberth, K. E.: Has global warming stalled? <u>http://www.rmets.org</u>, 19. 08. 2013, 3 S.
- Trenberth, K. E., Houghton, J. T., Meira Filho, L. G.: The Climate System: an overview. In: Climate Change 1995 The Science of Climate Change. Contribution of Working Group I to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge Univ. Press (1996), 55-64.
- Trenberth, K. E., Fasullo, J. T., Kiehl, J.: Earth's global energy budget. Bull. Amer. Meteorol. Soc. 90(2009), 311-323.
- Trenberth, K. E., Fasullo, J. T.: An apparent hiatus in global warming? Earth's Future, Vol. 1, Iss.1, Dec. 2013, 19-32. DOI: 10.1002/2013EF000165.
- Trenberth, K. E., Houghton, J. T., Meira Filho, L. G.: The Climate System: an overview. In: Climate Change 1995 – The Science of Climate Change. Contribution of Working Group I to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge Univ. Press (1996), 55-64.
- Wehry, W.: Eisschmelze erfasst Mitte Juli 2012 97% der Oberfläche Grönlands. Beitr. zur Berliner Wetterkarte 43/12, SO 20/12, 31. 7. 2012, 7 S.
- Wehry, W.: Sehr milder, nasser und stürmischer Winter 2014 in Europa. Beitr. zur Berliner Wetterkarte 18/14, SO 09/14, SO 09/14, 19. 3. 2014a, 8 S.
- Wehry, W.: Sehr kalter Winter 2013/14 in Nordamerika. Beitr. zur Berliner Wetterkarte 22/14, SO 11/14, 4. 4. 2014b, 8 S.
- WMO: WMO statement on the status of the global climate in 2013. WMO-No. 1130(2014), 24 S.
- Woods Hole Oceanographic Institution: El Niño & Other Oscillations. htpp://whoi.edu./main/topic/elnino-other-oscillations.
- Zhao, L., Wang, J.-S.: Robust response of the East Asian monsoon rainband to solar variability. Bull. Amer. Meteorol. Soc. 27(2014), 3043-3051.

Abbildungen



Figure 1.1: Schematic view of the components of the global climate system (bold), their processes and interactions (thin arrows) and some aspects that may change (bold arrows).

Abb.1: Schematische Darstellung des Klimasystems der Erde mit Transport- und Wechselwirkungsprozessen sowie Mechanismen von Klimaänderungen nach Trenberth et al. 1996, p. 55



In the second s

Abb.2(a): Abweichung der globalen Mitteltemperatur an der Erdoberfläche vom Mittelwert der Jahre 1961-90 nach drei Datenreihen (oben) und für Dekadenmittelwerte mit Unsicherheitsgrenzen (unten) nach IPCC 2013, Figure SPM.1, p. 6.

Abb.2(b): Beobachtete Änderungen der Lufttemperatur an der Erdoberfläche im Zeitraum 1901-2012 nach linearer Regression. Gitterboxen mit signifikanten Trends (10% Irrtumswahrscheinlichkeit) sind mit + gekennzeichnet. Nach IPCC 2013, Figure SPM.1, p. 6.



Abb.3: Abweichungen der Dekadenmitteltemperaturen, gemittelt für die Stationen de Bilt, Berlin/Potsdam, Basel und Wien vom 200 jährigen Mittelwert der Jahre 1761-1970 nach den Daten von Baur 1975 ff.



Box T5.5, Figure 1 Last-millennium simulations and reconstructions. (a) 850–2000 PMIP3/CMIP5 radiative forcing due to volcanic, solar and well-mixed greenhouse gases. Different colours illustrate the two existing data sets for volcanic forcing and four estimates of solar forcing. For solar forcing, solid (dashed) lines stand for reconstruction variants in which background changes in irradiance are (not) considered; (b) 850–2000 PMIP3/CMIP5 simulated (red) and reconstructed (shading) Northern Hemisphere (NH) temperature changes. The thick red line depicts the multi-model mean while the thin red lines show the multi-model 90% range. The overlap of reconstruction represent a smaller spatial domain than the full NH or a specific season, while annual temperatures for the full NH mean are shown for the simulations. (c), (d), (e) and (f) Arctic and North America annual mean temperature, and Europe and Asia June, July and August (JJA) temperature, from 950 to 2000 from reconstructions (black line), and PMIP3/CMIP5 simulations (thick red, multi-model nean; thin red, 90% multi-model range). All red curves are expressed as anomalies from their 1500–1850 mean and smoothed with a 30-year filter. The shaded envelope depicts the uncertainties from each reconstruction (Arctic: 90% confidence bands). For comparison with instrumental record, the Climatic Research Unit land station Temperature (CRUTEM4) data set is shown (yellow line). These instrumental data are not necessarily those used in calibration; cutoff timing may also lead to end effects for smoothed data shown. All lines are smoothed by applying a 30-year moving average. Map shows the individual regions for each reconstruction. [5.3.5; Table 5.A.1; Figures 5.1, 5.8, 5.12]

Abb.4: Verlauf des vulkanischen, des solaren und des treibhausgasbedingten Strahlungsantriebs (oben) sowie der simulierten (Kurvenzüge) und der aus Proxydaten rekonstruierten mittleren Lufttemperatur (schattiert) auf der Nordhalbkugel im letzten Jahrtausend, nach IPCC 2013, Box TS.5, Figure 1, p.78.



Figure SPM.2 | Maps of observed precipitation change from 1901 to 2010 and from 1951 to 2010 (trends in annual accumulation calculated using the same criteria as in Figure SPM.1) from one data set. For further technical details see the Technical Summary Supplementary Material. {TS TFE.1, Figure 2; Figure 2.29}

Abb.5: Beobachtete Änderung des jährlichen Niederschlags über Land (mm/Jahr) pro Jahrzehnt im Zeitraum von 1901 bis 2010 (links) bzw. von 1951 bis 2010 (rechts) nach IPCC 2013, Figure SPM.2, p. 8.



Figure SPM.3 | Multiple observed indicators of a changing global climate: (a) Extent of Northern Hemisphere March-April (spring) average snow cover; (b) extent of Arctic July-August-September (summer) average sea ice; (c) change in global mean upper ocean (0–700 m) heat content aligned to 2006–2010, and relative to the mean of all datasets for 1970; (d) global mean sea level relative to the 1900–1905 mean of the longest running dataset, and with all datasets aligned to have the same value in 1993, the first year of satellite altimetry data. All time-series (coloured lines indicating different data sets) show annual values, and where assessed, uncertainties are indicated by coloured shading. See Technical Summary Supplementary Material for a listing of the datasets. [Figures 3.2, 3.13, 4.19, and 4.3; FAQ 2.1, Figure 2; Figure TS.1]

Abb.6: Flächenausdehnung der nordhemisphärischen Schneedecke (März/April), der sommerlichen Meereisbedeckung (Juli bis September) und Veränderungen des Wärmeinhalts des Ozeans bis in 700m Tiefe sowie des globalen Meeresspiegelniveaus nach IPCC 2013, Figure SPM.3, p. 10.



Abb.7: Masseveränderung des grönländischen Inlandeises nach Wehry 2012, S. 6.



Figure SPM.4 [Multiple observed indicators of a changing global carbon cycle: (a) atmospheric concentrations of carbon dioxide (CO_2) from Mauna Loa (19°32'N, 155°34'W – red) and South Pole (89°59'S, 24°48'W – black) since 1958; (b) partial pressure of dissolved CO_2 at the ocean surface (blue curves) and in situ pH (green curves), a measure of the acidity of ocean water. Measurements are from three stations from the Atlantic (29°10'N, 15°30'W – dark blue/dark green; 31°40'N, 64°10'W – blue/green) and the Pacific Oceans (22°45'N, 158°00'W – light blue/light green). Full details of the datasets shown here are provided in the underlying report and the Technical Summary Supplementary Material. [Figures 2.1 and 3.18; Figure TS.5]

Abb.8: Atmosphärische CO₂-Konzentration nach Daten der Stationen Mauna Loa und Südpol (oben) sowie Partialdruck des gelösten CO₂ an der Meeresoberfläche und pH-Wert des Meerwassers (unten) nach Messungen im atlantischen und pazifischen Ozean nach IPCC 2013, Figure SPM.4, p. 12.



Figure TS.6 | Radiative forcing (RF) and Effective radiative forcing (ERF) of climate change during the Industrial Era. (Top) Forcing by concentration change between 1750 and 2011 with associated uncertainty range (solid bars are ERF, hatched bars are RF, green diamonds and associated uncertainties are for RF assessed in AR4). (Bottom) Probability density functions (PDFs) for the ERF, for the aerosol, greenhouse gas (GHG) and total. The green lines show the AR4 RF 90% confidence intervals and can be compared with the red, blue and black lines which show the AR5 ERF 90% confidence intervals (although RF and ERF differ, especially for aerosols). The ERF from surface albedo changes and combined contrails and contrail-induced cirrus is included in the total anthropogenic forcing, but not shown as a separate PDF. For some forcing mechanisms (ozone, land use, solar) the RF is assumed to be representative of the ERF but an additional uncertainty of 17% is added in quadrature to the RF uncertainty. [Figures 8.15, 8.16]

Abb.9: Strahlungsantrieb (oben) und effektiver Strahlungsantrieb (unten) im Jahre 2011 gegenüber dem Bezugsjahr 1750 nach IPCC 2013, Figure TS.6, p. 54.



Figure T5.12 | Comparison of observed and simulated change in the climate system, at regional scales (top panels) and global scales (bottom four panels). Brown panels are land surface temperature time series, blue panels are ocean heat content time series and white panels are sea ice time series (decadal averages). Each panel shows observations (black or black and shades of grey), and the 5 to 95% range of the simulated response to natural forcings (blue shading) and natural and anthropogenic forcings (pink shading), together with the corresponding ensemble means (dark blue and dark red respectively). The observed surface temperature is from the Hadley Centre/Climatic Research Unit gridded surface temperature data set 4 (HadCRUT4). Three observed records of ocean heat content (OHC) are shown. Sea ice anomalies (rather than absolute values) are plotted and based on models in Figure 10.16. The observations lines are either solid or dashed and indicate the quality of the observations and estimates. For land and ocean surface temperatures panels and precipitation panels, solid observation lines indicate where spatial coverage of areas being examined is above 50% coverage and dashed observation lines where coverage is below 50%. For example, data coverage of Antarctica never goes above 50% of the land area of the continent. For ocean heat content and sea ice panels the solid observations line is where the data coverage is only adequate. This figure is above on Figure 10.21 except presented as decadal averages rather than yearly averages. Further detail regarding the related Figure SPM.6 is given in the TS Supplementary Material. [Figure 10.21]

Abb.10: Beobachtete und unter Berücksichtigung natürlicher (blau) sowie natürlicher und anthropogener Antriebe (pink) simulierte Veränderungen der arktischen und antarktischen Meereisbedeckung, der Lufttemperatur an der Erdoberfläche und des Wärmeinhalts der Ozeane im globalen und in regionalen Maßstäben nach IPCC 2013, Figure TS.12, p. 74.



Figure 2: Observed global mean surface air temperatures anomalies 1860–2008, thin line (Obs.), reference period 1961–1990 (data from CRU, 2009⁴), neural network simulation (backpropagation, version 2, NN2) using the forcing data as shown in Fig. 1, heavy line (Sim.), and anthropogenic signals due to GHG (greenhouse gases, dashed line), SUL (sulphate aerosols, dotted line) such as GHG+SUL combined (grey line). Some explosive volcanic eruptions are indicated (arrows Kr etc.), furthermore the most dominant El Niño events (circles; note also caption within the upper part of the Figure).

Abb.11: Beobachtete und für verschiedene natürliche und anthropogene Antriebe mit einem neuronalen Netzwerk simulierter Verlauf der Abweichungen der globalen Mitteltemperatur an der Erdoberfläche gegenüber der Referenzperiode 1961-1990 nach Schönwiese et al. 2010, S. 6



Figure SPM.7 | CMIP5 multi-model simulated time series from 1950 to 2100 for (a) change in global annual mean surface temperature relative to 1986–2005, (b) Northern Hemisphere September sea ice extent (5-year running mean), and (c) global mean ocean surface pH. Time series of projections and a measure of uncertainty (shading) are shown for scenarios RCP2.6 (blue) and RCP8.5 (red). Black (grey shading) is the modelled historical evolution using historical reconstructed forcings. The mean and associated uncertainties averaged over 2081–2100 are given for all RCP scenarios as colored vertical bars. The numbers of CMIP5 models used to calculate the multi-model mean is indicated. For sea ice extent (b), the projected mean and uncertainty (minimum-maximum range) of the subset of models that most closely reproduce the climatological mean state and 1979 to 2012 trend of the Arctic sea ice is given (number of models given in brackets). For completeness, the CMIP5 multi-model mean is also indicated with dotted lines. The dashed line represents nearly ice-free conditions (i.e., when sea ice extent is less than 10⁶ km² for at least five consecutive years). For further technical details see the Technical Summary Supplementary Material [Figures 6.28, 12.5, and 12.28–12.31; Figures TS.15, TS.17, and TS.20]

Abb.12: Beobachteter und für unterschiedliche repräsentative Konzentrationspfade simulierte Verläufe der globalen Mitteltemperatur an der Erdoberfläche, der Meereisbedeckung auf der Nordhalbkugel im September und des pH-Wertes an der Meeresoberfläche nach IPCC 2013, Figure SPM.7, p. 21.



Figure SPM.9 | Projections of global mean sea level rise over the 21st century relative to 1986–2005 from the combination of the CMIPS ensemble with process-based models, for RCP2.6 and RCP8.5. The assessed *likely* range is shown as a shaded band. The assessed *likely* ranges for the mean over the period 2081–2100 for all RCP scenarios are given as coloured vertical bars, with the corresponding median value given as a horizontal line. For further technical details see the Technical Summary Supplementary Material {Table 13.5, Figures 13.10 and 13.11; Figures TS.21 and TS.22}

Abb.13: Projektionen des globalen Meeresspiegelanstiegs im 21. Jahrhundert für unterschiedliche Konzentrationspfade nach IPCC 2013, Figure SPM.9, p. 26.



Figure SPM.10 Global mean surface temperature increase as a function of cumulative total global CO₂ emissions from various lines of evidence. Multimodel results from a hierarchy of climate-carbon cycle models for each RCP until 2100 are shown with coloured lines and decadal means (dots). Some decadal means are labeled for clarity (e.g., 2050 indicating the decade 2040–2049). Model results over the historical period (1860 to 2010) are indicated in black. The coloured plume illustrates the multi-model spread over the four RCP scenarios and fades with the decreasing number of available models in RCP8.5. The multi-model mean and range simulated by CMIP5 models, forced by a CO₂ increase of 1% per year (1% yr⁻¹ CO₂ simulations), is given by the thin black line and grey area. For a specific amount of cumulative CO₂ emissions, the 1% per year CO₂ simulations exhibit lower warming than those driven by RCPs, which include additional non-CO₂ forcings. Temperature values are given relative to the 1861–1880 base period, emissions relative to 1870. Decadal averages are connected by straight lines. For further technical details see the Technical Summary Supplementary Material. [Figure 12.45; TS TFE.8, Figure 1]

Abb.14: Beobachtete bzw. für unterschiedliche repräsentative Konzentrationspfade simulierte kumulative anthropogene CO_2 -Emissionen und Abweichungen der mittleren globalen Lufttemperatur vom Mittelwert der Periode 1861-1880 bis zum Ende des 21. Jahrhunderts nach IPCC 2013, Figure SPM.10, p. 28.

Adresse des Verfassers: ha.kh.bernhardt@gmx.de