

Globale Klimavariabilität im Industriezeitalter – Phänomene und Ursachen

Christian-D. Schönwiese

Institut für Atmosphäre und Umwelt, Goethe-Universität Frankfurt a.M.

Abstract

Die Schätzwerte der global gemittelten bodennahen Lufttemperatur (Landgebiete und Ozeane) ab 1850 bzw. 1880 sind im Gegensatz zu anderen Klimagrößen besonders zuverlässig und genau. Sie zeigen einen langfristigen Erwärmungstrend, der überwiegend durch die anthropogene Emission klimawirksamer Spurengase verursacht ist, aber auch überlagerte anthropogene (Aerosole) sowie natürliche (Vulkanismus, Sonnenaktivität, El Niño usw.) Fluktuationen. Sie können den Erwärmungstrend vorübergehend abschwächen oder sogar umkehren. Eine solche Abschwächung (Hiatus) ist 1998-2013 eingetreten, aber 2015 war ein neues markantes Wärmerekordjahr. Diese gesamte Klimavariabilität ist durch aufwändige physikalische Klimamodelle bzw. statistische Studien (z.B. neuronale Netze) gut verstanden.

1. Einführung

Das Klima ist variabel in allen Größenordnungen der Zeit und des Raums, und dies aus den unterschiedlichsten Gründen. Die indirekten Klimarekonstruktionen der Paläoklimatologie reichen maximal 3,8 Mrd. Jahre zurück und decken somit fast die gesamte Erdgeschichte (4,6 Mrd. Jahre) ab (Schönwiese, 2013a). Jedoch werden sie immer ungenauer, je weiter sie zurück reichen. Direkte Messdaten in hinreichend globaler Abdeckung gibt es seit etwa 1850, insbesondere was die bodennahe Lufttemperatur betrifft (Messhöhe 2 m über Grund). Das gilt annähernd auch für die Meeresoberflächentemperatur. Im Gegensatz zur Paläoklimatologie existiert für diese Zeit, die sich in etwa mit dem Industriezeitalter (seit ca. 1800) deckt, somit eine sehr genaue Datenbasis in guter räumlicher und zeitlicher Auflösung. Man spricht dabei von der Neoklimatologie (Schönwiese, 2013a). Jedoch bleiben andere Klimatelemente wie z.B. der wesentlich variabelere Niederschlag (so wichtig er wegen seiner Auswirkungen auch ist) hinsichtlich Zuverlässigkeit und Genauigkeit deutlich hinter der Temperatur zurück, so dass sich dieser Beitrag auf die bodennahe Luft- und Meeresoberflächentemperatur beschränkt.

Die ausgeprägte räumliche Klimavariabilität mit ihren regionalen Besonderheiten kann den Überblick und auch die Ursachendiskussion sehr erschweren. Daher sollen hier globale Mittelwerte (Landgebiete und Ozeane) im Blickpunkt stehen, kurz die Globaltemperatur, eine Kombination aus der bodennahen Luft- und Meeresoberflächentemperatur. Die zeitliche Auflösung beträgt ein Jahr. Die so definierte Temperatur wird oft als relativ einfache Kenngröße angesehen, die den klimatologischen Zustand unseres Planeten zusammenfassend kennzeichnet. Am bekanntesten ist in diesem Zusammenhang die relativ langfristige „globale Erwärmung“, ein typisches Merkmal des Industriezeitalters (IPCC, 2014). Sie ist jedoch von vielfältigen relativ kurzfristigen Fluktuationen bzw. Jahresanomalien (d.h. relativ markanten jährlichen Abweichungen vom zeitlichen Mittelwert bzw. Trend) überlagert. Zentrale Aufgabe der Klimatologie muss es sein, alle diese zeitlichen Strukturen möglichst verlässlich und genau zu erfassen und die Ursachen der dabei ersichtlichen zeitlichen Klimavariabilitätsstrukturen möglichst weitgehend zu klären. Darum soll es im Folgenden gehen.

2. Datenbasis

Es gibt weltweit drei Institutionen, die Daten der bodennahen Luft- und Meeresoberflächen-Temperaturen bereitstellen, im Allgemeinen in Form von Gitterpunkt-bezogenen Datensätzen, zusammen mit den hemisphärischen und globalen Mittelwerten. Dies ist die Climatic Research Unit (CRU) der Universität Norwich (UK), das Goddard Institute for Space Studies (GISS) der NASA (USA) und die National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), genauer das dortige Klimadatenzentrum (National Climate Data Center, NCDC, ebenfalls USA). Im letzteren Fall wird auch vom Global Historical Climate Network (GHCN) gesprochen. Diese Datensätze werden ständig aktualisiert und sind hier in der Version vom Februar 2016 benutzt (CRU, 2016, als CRU4 bezeichnet; GISS, 2016; NOAA, 2016). Derzeit kann dabei die gemeinsame Zeitspanne 1880-2015 erfasst werden.

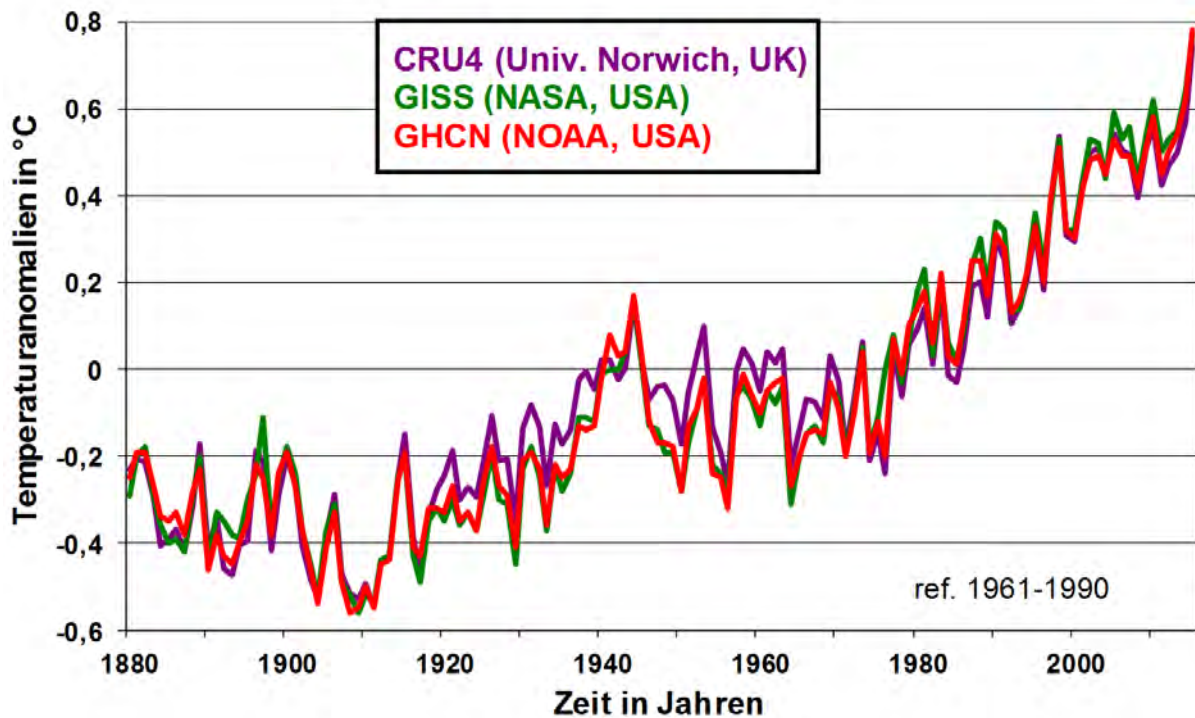


Abb.1: Globaltemperatur-Anomalien 1880-2015 (relativ zu 1961-1990) nach drei verschiedenen Datenquellen (vgl. Text)

In Abb. 1 sind diese drei Zeitreihen miteinander verglichen. Obwohl die Anzahl der verwendeten Stationen (derzeit CRU 5583, GISS ca. 6300 und GHCN/NOAA 7280 Stationen, um 1880 grob geschätzt 500 Stationen) und auch die Bearbeitungsmethoden (insbesondere der Umgang mit sog. Inhomogenitäten, die z.B. durch Standortwechsel der Stationen zustande kommen) etwas unterschiedlich sind, ist die Übereinstimmung sehr gut (Korrelationen $> 0,99$). Übrigens ist es bei solchen flächenbezogenen Daten üblich, sie als Anomalien auszudrücken, d.h. als Abweichungen vom zeitlichen Mittelwert einer bestimmten Bezugsperiode. Dies ist hier 1961-1990 (entsprechend den Empfehlungen der Weltmeteorologischen Organisation, WMO). Leider benutzen nicht alle Institutionen diese Bezugsperiode, so dass hier alle Daten einheitlich darauf umgerechnet sind. Da eine Datenquelle, nämlich CRU, die Daten bereits ab 1850 zur Verfügung stellt, vgl. Abb. 2 (siehe folgende Seite), soll nun anhand dieser Zeitreihe eine kurze Diskussion der dabei ersichtlichen zeitlichen Variabilitätsstrukturen erfolgen.

3. Analyse der zeitlichen Änderungsstrukturen

Am auffälligsten ist der langzeitliche Erwärmungstrend (die bereits erwähnte „globale Erwärmung“), der jedoch nicht linear ist. Daher ist in Abb. 2 ein polynomialer Trend eingezeichnet. Man erkennt, dass diese Erwärmung ungefähr um 1900 begonnen hat (genauer nach dem relativen Minimum des Jahres 1911). In einem nächsten Schritt ist eine 20-jährige Glättung (Gauß'scher Tiefpassfilter, Methodik siehe Schönwiese, 2013b) durchgeführt worden, um die in dieser Zeitreihe enthaltenen dekadischen Fluktuationen zu verdeutlichen (natürlich sind dabei auch andere Zeitreihenfilterungen möglich). Nun zeigt sich, dass sich die globale Erwärmung auf zwei Zeitintervalle konzentriert, nämlich 1911-1944 und nach 1976. Dazwischen ist eine Unterbrechung eingetreten, und zwar in Form einer leichten Abkühlung, in der Literatur inzwischen als „großer Hiatus“ bezeichnet (1947-1976; Trenberth, 2015). Besonders große Aufmerksamkeit hat jedoch die Verlangsamung der Erwärmung in der Zeit ca. 1998-2013 gefunden (sozusagen jüngster Hiatus), insbesondere in den Medien, wobei teilweise über das Ende der globalen Erwärmung spekuliert wurde (einschließlich der irrigen Behauptung, die Klimatologen würden über die Ursache rätseln). Wie man sowohl in Abb. 1 als auch Abb. 2 sieht, ist ganz im Gegenteil im Jahr 2015 ein markanter neuer Rekordwert der Globaltemperatur eingetreten.

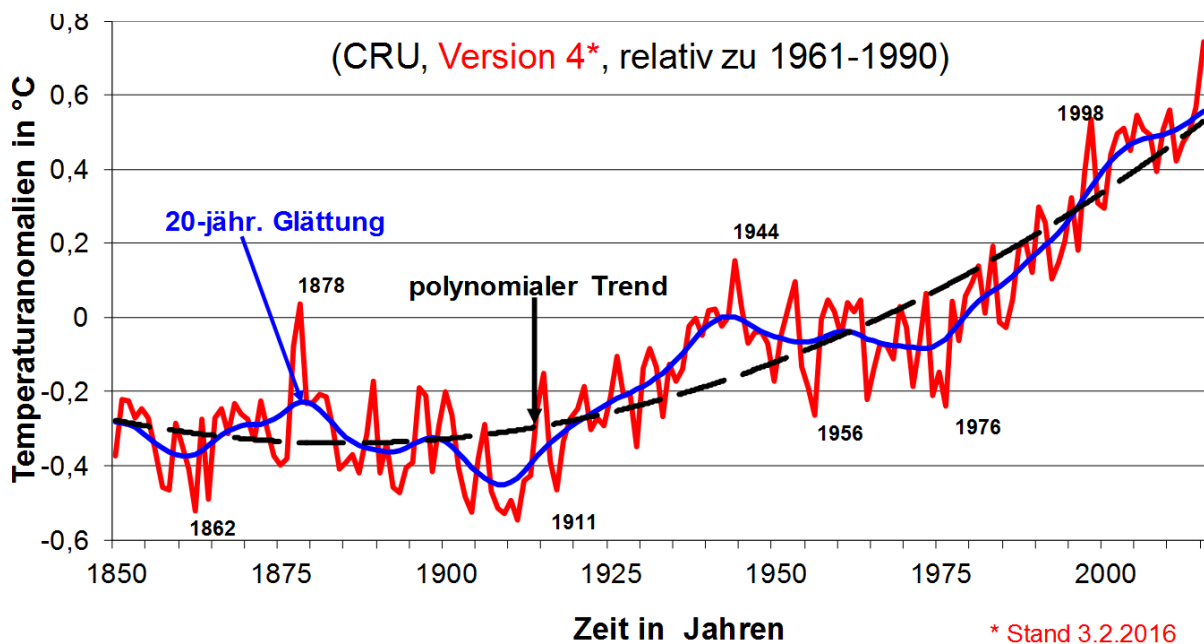


Abb. 2: Ähnlich wie Abb. 1, jedoch nur Datenquelle CRU und Erweiterung auf 1850-2015, zusätzlich polynomialer Trend und 20-jährige Glättung (entspr. Bearbeitung Schönwiese).

Neben dem Langfristtrend und den dekadischen Fluktuationen treten somit die Jahresanomalien in den Blickpunkt, seien es gegenüber dem Langfristtrend bzw. den dekadischen Fluktuationen markante Abweichungen nach oben, so der genannte Wärmerekord des Jahres 2015 und die relativen Maxima z.B. in den Jahren 1998, 1944 und 1878, oder seien es markante Abweichungen nach unten, so z.B. die relativ kühlen Jahre 1976, 1956, 1911 und 1862; vgl. jeweils Abb. 2. Bevor in die Ursachendiskussion eingetreten wird, sind in Tab. 1 (nächste Seite) die linearen Trends für die gesamte Zeitspanne ab 1880 sowie für ausgewählte Subintervalle zusammengestellt, verbunden mit einem Vergleich der verschiedenen Datenquellen (wie in Abb. 1). Nur am Rand sei vermerkt, dass in der Literatur, so auch beim

IPCC (2014), lineare Trends bevorzugt werden, obwohl nicht lineare oft angebrachter wären (allerdings mit dem Problem, welche Art von Nicht-Linearität dabei jeweils betrachtet werden soll und Problemen bei Vergleichen, falls dafür unterschiedliche Ansätze verwendet werden). Um die Vergleiche zu erleichtern, beruhen daher auch alle in Tab. 1 angegebenen Werte auf linearen Trendanalysen.

Das Intergovernmental Panel on Climate Change hat in seinem letzten Bericht (IPCC, 2014) den Trend der Globaltemperatur für 1880-2012 mit $+ 0,85 \text{ °C} \pm 0,2 \text{ °C}$ angegeben. Das entspricht dem Mittelwert, wie er sich aus den drei verfügbaren Datenquellen ergibt (Tab. 1), allerdings mit der wesentlich geringen Unschärfe von $\pm 0,02 \text{ °C}$. Inzwischen ist dieser Trend, einschließlich 2015, auf rund $+ 0,9 \text{ °C}$ angewachsen ($0,88 - 0,93 \text{ °C}$). Für den jüngsten Hiatus (Jahre 1998-2013) ergeben sich je nach Datenquelle relativ geringe Erwärmungen von $0,09 - 0,15 \text{ °C}$. Allerdings müssen diese Werte zu Vergleichszwecken auf Trends pro Dekade (Jahrzehnt) umgerechnet werden (jeweils zweite Zeile in Tab. 1). Dann ist der Unterschied zum Zeitintervall 1880-2015 nur marginal (jeweils Größenordnung ca. $0,05 - 0,08 \text{ °C/D}$ mit D = Dekade). Dieser jüngste Hiatus verschwindet vollends, wenn das Zeitintervall 1998 - 2015 betrachtet wird. Der größte dekadische Erwärmungstrend ist offenbar in der Zeit seit 1976 aufgetreten (ca. $0,16 - 0,17 \text{ °C/D}$), also in der jüngsten der beiden oben genannten Zeitintervalle, auf die sich die globale Erwärmung bisher konzentriert hat. Für das frühere dieser Intervalle errechnet sich ca. $0,14 \text{ °C/D}$ (Datenquelle CRU; vgl. jeweils Tab. 1).

Zeitspanne	CRU	GISS	NOAA
1880 - 2012*	0,83 °C <i>0,063 °C/D</i>	0,87 °C <i>0,066 °C/D</i>	0,85 °C <i>0,064 °C/D</i>
1880 - 2015	0,88 °C <i>0,065 °C/D</i>	0,93 °C <i>0,068 °C/D</i>	0,91 °C <i>0,067 °C/D</i>
1998 - 2013	0,09 °C <i>0,054 °C/D</i>	0,15 °C <i>0,068 °C/D</i>	0,14 °C <i>0,080 °C/D</i>
1998 - 2015	0,18 °C <i>0,103 °C/D</i>	0,25 °C <i>0,138 °C/D</i>	0,25 °C <i>0,139 °C/D</i>
1976 - 2015	0,69 °C <i>0,172 °C/D</i>	0,68 °C <i>0,171 °C/D</i>	0,65 °C <i>0,163 °C/D</i>

* IPCC (2014): $0,85 \pm 0,2 \text{ °C}$

1911 - 1944 (CRU): $0,14 \text{ °C/D}$ ($0,46 \text{ °C}$)

Tab. 1: Lineare Trends der Globaltemperatur für verschiedene Zeitintervalle, absolut und pro Dekade (D); Datenquellen wie in Abb. 1.

4. Ursachendiskussion

Eine wesentliche physikalische Grundlage jeglicher klimatologischen Ursachendiskussion und Modellierung sind die Strahlungsantriebe. Darunter versteht man die Änderung der Bilanz aus solarer Einstrahlung und terrestrischer Ausstrahlung in der Troposphäre (unterste atmosphärische Schicht, in der Standardatmosphäre bis 11 m Höhe) bzw. an der Tropopause (Obergrenze dieser Schicht), wie sie durch verschiedenen Prozesse zustande kommt. Einer dieser Prozesse ist die anthropogene Emission von klimawirksamen Spurengasen (CO_2 , CH_4 , N_2O , FCKW usw.), die bekanntlich die atmosphärischen Konzentrationen diese Gase erhöht (im Fall von CO_2 von vorindustriell ca. 280 ppm auf heute rund 400 ppm). Ebenfalls bekanntlich kommt es dadurch zu einem zusätzlichen anthropogenen Treibhauseffekt, also

einer bodennahen Erwärmung, so dass dieser Strahlungsantrieb positiv ist. Nach IPCC-Angaben (2014) ergibt sich für die dort genannte Zeitspanne 1750-2011 ein Wert von rund $+3,3 \text{ Wm}^{-2}$ (mit einem CO_2 -Anteil von 57,4 %, falls man auch die Oxidation von CO mit einrechnet).

Die ebenfalls anthropogene direkte bzw. indirekte Emission von Aerosolen führt dagegen zu einem negativen Strahlungsantrieb, der sich aus einem direkten und indirekten Wert (aufgrund der Änderung der optischen Eigenschaften der Wolken) zusammensetzt und hauptsächlich auf Sulfat- und Nitratpartikel zurückgeht. Der daraus resultierende Wert des Strahlungsantriebs ist quantitativ wesentlich unsicherer als der Strahlungsantrieb der sog. Treibhausgase (u.a. weil noch weitere Substanzen hinzukommen und z.B. der Anteil durch „black carbon“ einen positiven Antrieb bewirkt). Er lässt sich jedoch in einer Größenordnung von summarisch -1 Wm^{-2} abschätzen. Damit reduziert sich der gesamte anthropogene Strahlungsantrieb im Industriezeitalter auf rund $+2,3 \text{ Wm}^{-2}$ (IPCC, 2014).

Es darf dabei aber nicht übersehen werden, dass es nach wie vor auch natürliche Einflüsse auf das Klima gibt. Einer dieser Einflüsse beruht auf der (fluktuierenden) Sonnenaktivität, für die das IPCC aber nur $0,05 (\pm 0,05) \text{ Wm}^{-2}$ angibt. Im Gegensatz zur vorindustriellen Zeit spielt die Sonnenaktivität somit derzeit praktisch keine Rolle, was im Übrigen auch am Verhalten der stratosphärischen Temperatur erkennbar ist: Parallel zur bodennahen Zunahme hat sie seit 1968 (nur seit dieser Zeit ist sie global systematisch erfasst worden) abgenommen, wie es die Physik des Treibhauseffektes erwarten lässt. Würde die Sonnenaktivität als Einflussfaktor dominieren, müssten die Langfristtrends der unteren und oberen Atmosphäre gleichsinnig verlaufen. Erwähnenswert ist in diesem Zusammenhang auch, dass die Sonnenaktivität im Jahr 2015 gegenüber dem Vorjahr abgenommen hat und somit nicht nur die langfristige bodennahe Erwärmung, sondern auch die Temperaturanomalie des Jahres 2015 keinesfalls etwas mit der Sonnenaktivität zu tun haben kann.

Anders ist es beim explosiven Vulkanismus, der – wie der Name sagt – explosionsartig Gase und Partikel bis in die Stratosphäre (ca. 10 - 50 km Höhe) hinauf schleudert (in extremen Fällen sogar noch höher). Besonders klimawirksam sind dabei stratosphärische Sulfatpartikelschichten, die sich durch Gas-Partikel-Umwandlungen aus schwefelhaltigen Gasen im Verlauf von einigen Monaten bilden und eine Verweilzeit von ca. 2-3 Jahren haben. Sie streuen verstärkt die Sonneneinstrahlung, so dass die Transmission in die untere Atmosphäre abnimmt, was dort zu Abkühlungseffekten und somit zu einem negativen Strahlungsantrieb führt. Wegen der genannten gegenüber den „Treibhausgasen“ wesentlich kürzeren atmosphärischen Verweilzeit des vulkanogenen Aerosols handelt es sich um episodische Effekte, die mitunter erst ein Jahr nach der betreffenden Vulkaneruption maximal sind und danach rasch abklingen. Sie können aber kurzzeitig relativ große Strahlungsantriebe bewirken und somit die globale Erwärmung wirksam unterbrechen. Beispielsweise wird dem Pinatubo-Vulkanausbruch des Jahres 1991 ein Strahlungsantrieb von $2,4 \text{ Wm}^{-2}$ zugeordnet, 1992 sogar $3,2 \text{ Wm}^{-2}$ (1993 nur noch unter 1 Wm^{-2} und danach rasch weiter abklingend; McCormick, 1995).

Ein weiterer Einfluss, der gerade in jüngerer Zeit verstärkt diskutiert wird, ist der ENSO-Mechanismus. Dabei bedeutet EN El Niño, eine episodische Erwärmung der tropischen Ozeane, insbesondere des tropischen Ostpazifiks vor den Küsten vor Peru und Ecuador, die aber sehr weit auf den Ozean hinausreicht, somit große Flächen einnimmt und daher deutlich in der Globaltemperatur „durchschlägt“. SO bedeutet Südliche Oszillation, eine Luftdruckschwankung der Südhemisphäre, die mit EN hoch korreliert ist, so dass ENSO insgesamt ein atmosphärisch-ozeanischer Wechselwirkungsvorgang ist. Im Gegensatz zu EN, den sog. ozeanischen Warmwasserereignissen, gibt es auch das Gegenstück La Niña (LN), die

Kaltwasserereignisse (relativ kalter tropischer Ostpazifik). Da diesem Vorgang kein Strahlungsantrieb zugeordnet werden kann, ist die physikalische Modellierung im Kontext der sog. externen Einflüsse auf das Klimasystem, die sich über Strahlungsantriebe definieren lassen, problematisch und daher früher meist unterblieben (jedoch nicht bei speziellen separaten ENSO-Modellierungen).

5. Modellierung

Bei der Modellierung der klimatologischen Ursache-Wirkung-Prozesse gibt es physikalische und statistische Methoden. Dabei dominieren physikalische Methoden, die in ihrer aufwändigsten Ausprägung gekoppelte atmosphärisch-ozeanische Zirkulationsmodelle sind. Das heißt, ausgehend von den Strahlungsantrieben werden mit Hilfe physikalischer Gleichungssysteme in möglichst guter räumlicher (dreidimensionale Gitterpunktsysteme) und zeitlicher Auflösung die Bewegungsvorgänge (Zirkulation) simuliert, die ihrerseits bestimmte Effekte bei den Klimagrößen (z.B. Temperatur) bewirken (IPCC, 2014). Hinsichtlich der anthropogenen Klimabeeinflussung im Industriezeitalter werden u.a. Klimamodell-Vergleichsprojekte (Climate Model Intercomparison Projects, CMIP) durchgeführt, möglichst unter Beteiligung aller Institutionen weltweit, die solche aufwändigen Modelle betreiben.

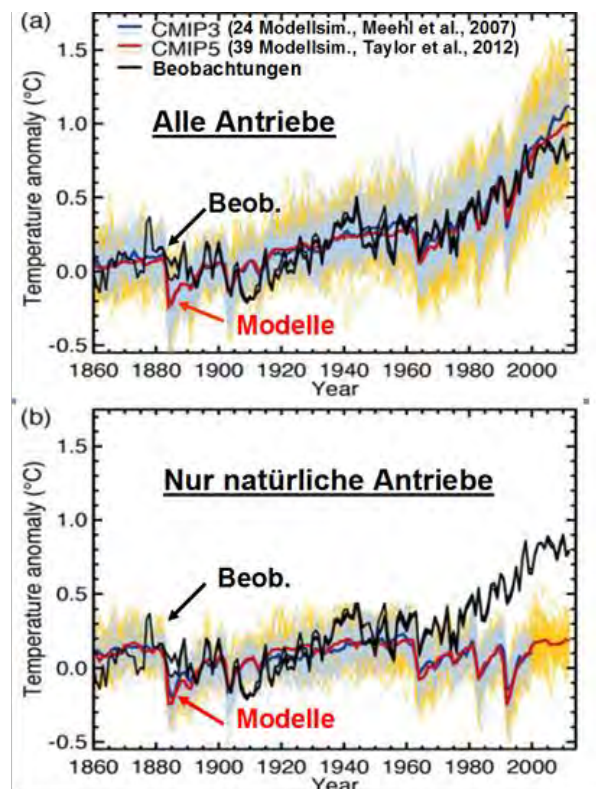


Abb. 3: Klimamodellsimulationen der Globaltemperatur-Anomalien 1860-2011 (relativ zu 1880-1919) im Vergleich mit den Beobachtungsdaten. Die Modellergebnisse stammen von den Klimamodell-Vergleichsprojekten CMIP3 und CMIP5, vgl. Text. Insbesondere die Erwärmung seit ca. 1970 ist nur erklärbar, wenn nicht wie unten nur natürliche Antriebe, sondern auch anthropogene berücksichtigt werden (IPCC, 2014).

Die derzeit jüngsten derartigen Modellergebnisse (CMIP5, 39 Modellrechnungen; Taylor et al., 2012) sind in Abb. 3 (nach IPCC, 2014) für die Zeit 1860-2012 zu sehen, und zwar in Form des mittleren Modellergebnisses (rote Linie) und der Bandbreite dieser Modellergebnisse (gelb unterlegt). Je nachdem, wie bestimmte Teilaspekte, z.B. die Bewölkung, behandelt werden und je nachdem, wie infolgedessen die Rückkopplungseffekte ausfallen,

liefern solche Modelle nämlich im Einzelnen unterschiedliche Ergebnisse. In der gleichen Abbildung sind auch noch die CMIP3-Ergebnisse (24 Modellrechnungen; Meehl et al., 2007) angegeben (blau unterlegt, wegen der geringeren Anzahl der Modellrechnungen geringere Bandbreite der Einzelergebnisse). Das IPCC (2014) sieht es als besonders wichtiges Teilergebnis der Klimaforschung an, dass bei solchen Modellsimulationen insbesondere der Temperaturanstieg der letzten Jahrzehnte nicht erklärt werden kann, wenn nur natürliche Einflüsse (insbesondere solar und vulkanisch) berücksichtigt werden (Abb. 3, unten), sondern nur, wenn anthropogene Einflüsse („Treibhausgase“ und Aerosole) hinzukommen (Abb. 3, oben). Somit muss der im globalen Mittel beobachtete langfristige Erwärmungstrend mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit (das IPCC gibt dafür > 95 % an) als anthropogen angesehen werden (übrigens zusammen mit dem ebenfalls langfristigen Abkühlungstrend der Stratosphäre).

Weniger befriedigend ist bei solchen Modellen die Reproduktion und somit das Verständnis der überlagerten relativ kurzfristigen Fluktuationen und Jahresanomalien. Doch helfen dabei statistische Methoden, insbesondere neuronale Netze (Brause, 1995, und zahlreiche weitere Grundlagenliteratur, vgl. auch Walter, 2001 und Schönwiese, 2013b) weiter. Da sie, wie die Korrelations- und Regressionsanalyse, nach Ähnlichkeitsprinzipien arbeiten (jedoch nicht-linear), besteht dabei einerseits der prinzipielle Nachteil, dass die Physik nicht berücksichtigt wird. Andererseits kann als Vorteil angesehen werden, dass ausschließlich Beobachtungsdaten im Blickpunkt stehen, wobei in einer Art Training die optimalen Beziehungen zwischen Einfluss- und Zielgrößen ermittelt werden und somit die tatsächlich beobachtete Zielgröße, hier wiederum die global gemittelte bodennahe Lufttemperatur (Globaltemperatur), möglichst weitgehend reproduziert wird (somit nach Maximierungsprinzipien der erklärten Varianz).

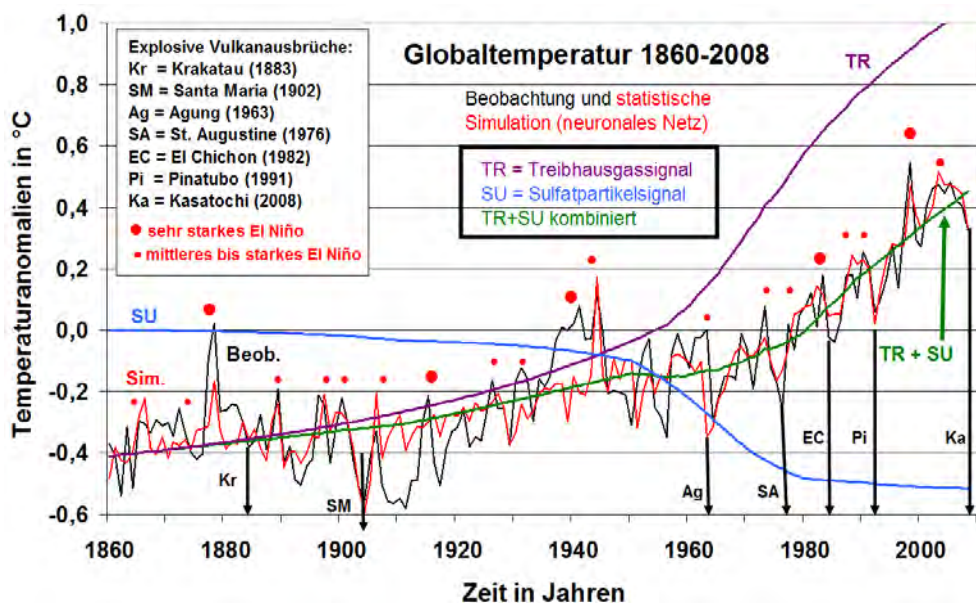


Abb. 4: Simulation der Globaltemperatur-Anomalien 1860-2008 (älterer CRU-Datensatz, schwarz) relativ zu 1961-1990, mit Hilfe eines neuronalen Netzes (rot). TR ist der Effekt (sog. Signal) der „Treibhausgase“, SU der Sulfataerosole und TR+SU ist die (nicht-lineare) Kombination von beidem. Einige vulkanisch bedingte Abkühlungen (schwarze Pfeile) und El-Niño-bedingte Erwärmungen (rote Punkte) sind deutlich zu erkennen (Schönwiese et al., 2010).

In Abb. 4 ist für die Zeit 1860-2008 eine solche neuronale Netz-Simulation wiedergegeben (Backpropagation), wiederum im Vergleich mit den Beobachtungsdaten (allerdings ältere CRU-Version, Schönwiese et al., 2010; aktuelle Neuberechnungen sind auf dem Weg). Als Einflussgrößen dienten die äquivalente CO₂-Konzentration (wobei die über CO₂ hinaus

gehenden Anteile der weiteren klimawirksamen Spurengase über deren Strahlungsantriebe in Zuschlagswerte umgerechnet sind), die Sulfataerosole, die Sonnenaktivität, der Vulkanismus und der ENSO-Mechanismus (der bei dieser statistischen Methodik, im Gegensatz zu den physikalisch basierten Klimamodellen, einfach als zusätzliche Einflussgröße behandelt werden kann). Ein weiterer Vorteil besteht darin, dass nun die Wirkung einzelner Einflussgrößen näherungsweise isoliert erfasst werden kann (die sog. Klimasignale). In Abb. 4 ist das die jeweils anthropogene Wirkung der „Treibhausgase“ (TR, Erwärmung) und der Sulfat-Aerosole (SU, Abkühlung). Die (nicht-lineare) Summe aus beidem ist der anthropogene Klimawandel, der offenbar weitgehend mit der Langfristentwicklung übereinstimmt, für diese Zeit bei ca. $+0,9\text{ °C}$ liegt und 61 % der beobachteten Varianz erklärt.

Die überlagerten Jahresanomalien lassen sich im Fall von Abkühlungen einigen explosiven Vulkanausbrüchen zuordnen (z.B. Pinatubo, 1991→1992), im Fall von Erwärmungen besonders ausgeprägten El-Niño-Ereignissen (z.B. 1998). Einschließlich der nur sehr gering wirksamen Sonnenaktivität beträgt die erklärte natürliche Varianz hier 27 % (somit insgesamt erklärte Varianz 88 % bzw. 12 % unerklärte Varianz, die bei näherer Analyse Zufallseigenschaften aufweist; Schönwiese et al., 2010). Der sog. große Hiatus (1947-1976) ist daher, und zwar noch deutlicher als bei den physikalischen Modellrechnungen, dem anthropogenen Aerosol-Einfluss zuzuordnen.

Inzwischen konnte auch mit physikalisch basierten Klimamodellen insbesondere der neue Hiatus 1998-2013 gut erklärt werden, falls wie bei den neuronalen Netzen der ENSO-Mechanismus als zusätzliche Einflussgröße behandelt wird, siehe Abb. 5 nach Kosaka und Xie (2013). Ohne diese Berücksichtigung hätte aus Modellsicht statt dieses jüngsten Hiatus eine stärkere Erwärmung stattfinden sollen, als sie tatsächlich beobachtet worden ist. Genauer gesagt lässt sich dieser jüngste Hiatus also über das Ausbleiben von EN (El Niño) und stattdessen eine Häufung von LN (La Niña) erklären. In der Klimadiskussion taucht außerdem noch die Vermutung auf, dass der Ozean in dieser Zeit verstärkt Wärme aufgenommen hat, aufkosten der Atmosphäre (DMG, 2015).

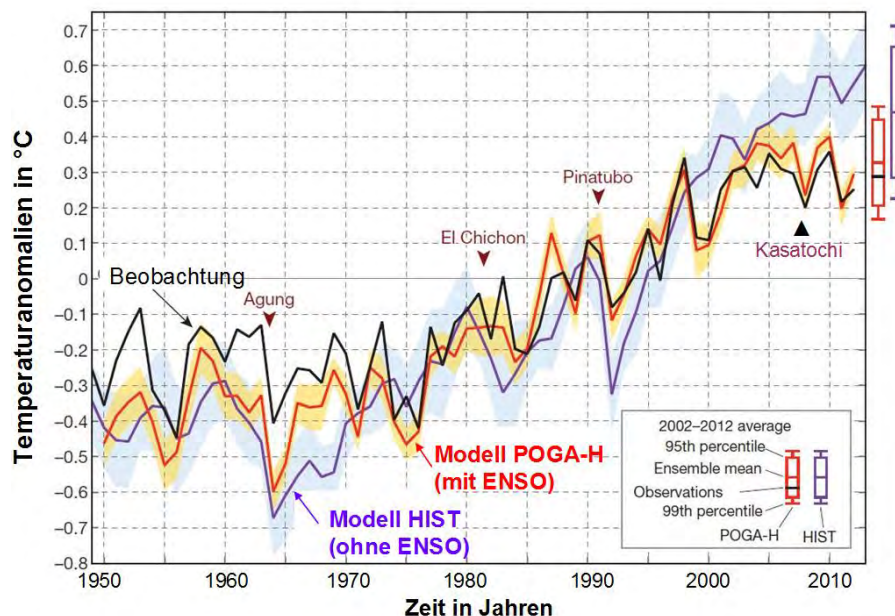


Abb. 5: Simulation der Globaltemperatur-Anomalien 1949-2012 ohne (lila) und mit (rot) Berücksichtigung des ENSO-Mechanismus (El Niño / Südl. Oszillation) nach Kosaka und Xie (2013). Man erkennt, dass in jüngster Zeit die Beobachtung (schwarz) mit ENSO-Berücksichtigung wesentlich besser approximiert wird als ohne.

Auch die Weltmeteorologische Organisation (WMO, 2015) hat jüngst auf diesen ENSO-Einfluss hingewiesen, indem sie die Temperaturanomalien (ebenfalls bodennah und global gemittelt, in diesem Fall auch gemittelt hinsichtlich der drei in Abb. 1 verwendeten Datenquellen) seit 1950 nicht nur dargestellt, sondern dabei auch die EN- und LN-Jahre (d.h. El Niño bzw. La Niña) farblich gekennzeichnet hat, siehe Abb. 6 (nächste Seite). Dabei ist nun auch das jüngste sehr starke El-Niño-Ereignis des Jahres 2015 berücksichtigt, das zu dem in diesem Jahr beobachteten sehr markanten Wärmerekord sicherlich wesentlich beigetragen hat. Markiert man zusätzlich noch die Jahre, in denen größere explosive Vulkanausbrüche stattgefunden haben, so lässt sich auf diese Weise auch auf deren Abkühlungswirkung hinweisen. Der sog. große Hiatus (bis 1976) zeigt sich auch hier, jedoch nicht mehr der jüngste (ab 1998), statt dessen eine markante globale Erwärmung bis in die neueste Zeit (2015; genauer die zweite Phase der globalen Erwärmung, wie im Zusammenhang mit Abb. 1 und 2 sowie Tab. 1 und der zugehörigen Variabilitätsanalyse bereits erläutert).

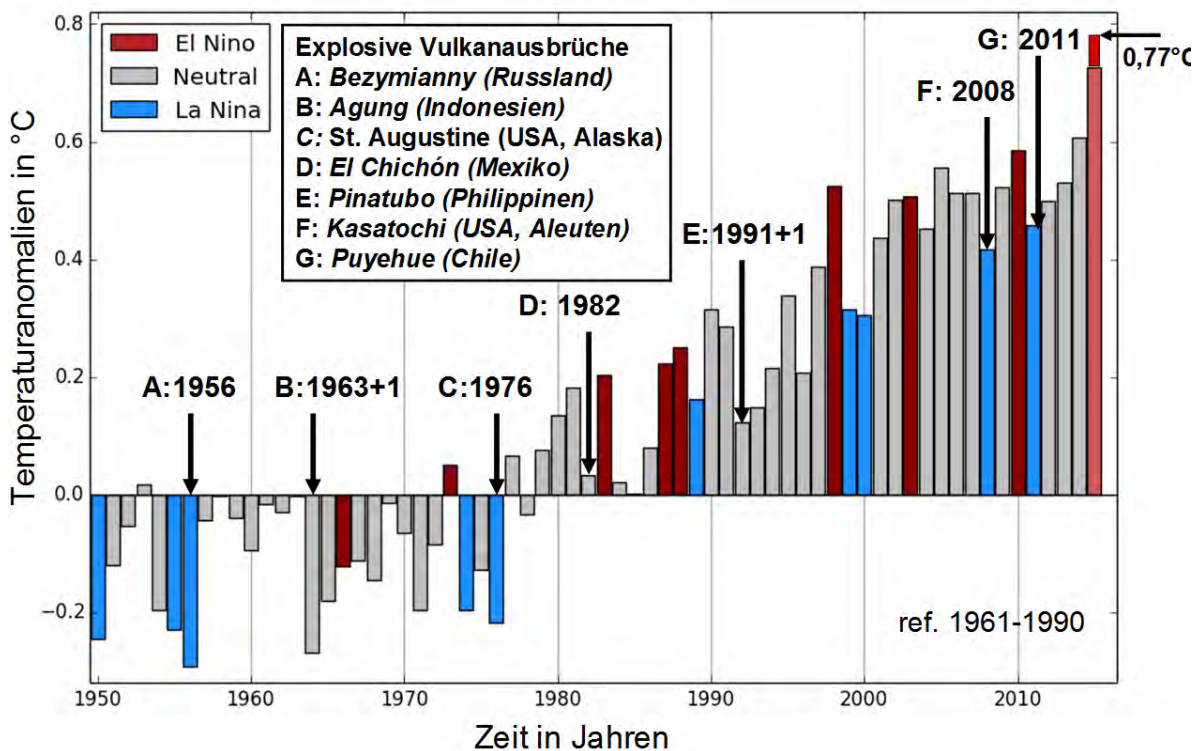


Abb. 6: Globaltemperatur-Anomalien 1950-2015 (relativ zu 1961-1990, Mittelung der Daten CRU4, GISS und NOAA; vgl. Abb. 1) und Markierung der Jahre mit El-Niño- (rot) und La-Niña- (blau) Ereignissen (WMO, 2015, aktualisiert und ergänzt). Offenbar hat nach 1976 eine markante Erwärmung stattgefunden, die mittlerweile einen Hiatus nicht mehr erkennen lässt.

6. Schlussfolgerungen

Das Industriezeitalter ist klimatologisch durch einen relativ langfristigen Anstieg der bodennahen Lufttemperatur gekennzeichnet, der im globalen Mittel (Landgebiete und Ozeane) 1880-2015 rund 0,9 °C beträgt. Jedoch ist dieser Anstieg nicht gleichmäßig verlaufen, sondern war auf die Zeitintervalle 1911-1944 und nach 1976 konzentriert. Dabei ist der langfristige Anstieg weitgehend auf die anthropogene Emission und daher atmosphärische Konzentrationszunahme von klimawirksamen Spurengasen („Treibhaus-gasen“) zurückzuführen, die leichte Abkühlung ca. 1947-1976 (sog. großer Hiatus) auf die vorübergehende Dominanz der ebenfalls anthropogenen Aerosolbildung (insbesondere

Sulfatpartikel). Die verringerte Erwärmung ca. 1998-2013 (jüngster Hiatus) ist ozeanisch bedingt, nämlich durch seltenere bzw. schwächere El-Niño-Ereignisse zugunsten von häufigeren und wirksameren La-Niña-Ereignissen (relativ kalter tropischer Ostpazifik). Dieser Hiatus ist aber mittlerweile kaum mehr erkennbar. Bei den Jahresanomalien spielen im Fall von relativ warmen Jahren ebenfalls El-Niño-Ereignisse eine wesentliche Rolle, bei relativ kalten Jahren eher explosive Vulkanausbrüche. Die Sonnenaktivität war zumindest in den letzten Jahrzehnten ohne erkennbare klimatologische Bedeutung. Da der anthropogene Anteil des Klimawandels offenbar andauert, resultieren aus diesen Erkenntnissen über die Klimavergangenheit erhebliche Probleme für die Klimazukunft und folglich für die Menschheit, die davon betroffen sein wird (IPCC, 2014; Schönwiese, 2013a).

Anhang: Wie realistisch ist die klimapolitische 2-Grad-Grenze?

In der aktuellen klimapolitischen Diskussion spielt die sog. 2-Grad-Grenze eine hervorgehobene Rolle, so bei den Vertragsstaatenkonferenzen (engl. Conference of Parties, COP) zur UN-Klimarahmenkonvention (1992). In dieser Konvention war kurz gesagt das Ziel vereinbart worden, die „Treibhausgasemissionen auf einem ungefährlichen Niveau zu stabilisieren“, allerdings ohne dabei quantitative Aussagen dazu zu machen, ab welchem Ausmaß des Klimawandels bzw. seiner menschlichen Beeinflussung (durch Treibhausgasemissionen) eine gefährliche Situation eintreten könnte. Wie Schellnhuber (2015) ausführlich berichtet, hat er in Orientierung an den Klimawandel der letzten Jahrhunderte (beispielsweise war es in der Eem-Warmzeit mit Höhepunkt vor ca. 125 000 Jahren im globalen und langzeitlichen Mittel ungefähr 1,5 °C wärmer als heute) bereits ab 1993 die Vorstellung entwickelt, dass ein Anstieg der Globaltemperatur um mehr als 2 °C über das vorindustrielle Niveau hinaus als gefährlich angesehen werden sollte. Über den Wissenschaftlichen Beirat Globale Umweltveränderungen (WBGU) der Bundesregierung hat er diese Vorstellung in die klimapolitische Diskussion getragen, so dass sie bald in der EU und sogar schon bei COP1 (Berlin, 1995) Beachtung gefunden hat. Dann hat es allerdings bis 2009 (COP15, Kopenhagen) gedauert, bis bei diesen Konferenzen die 2-Grad-Grenze wieder explizit erwähnt worden ist. Nun, nach einigen Zwischenschritten, ist diese Grenze seit 2015 (COP21, Paris) definitiv im Vertragstext verankert, wobei COP21 sogar möglichst nur 1,5 °C realisiert sehen möchte. Aus dem vorliegenden Beitrag ist ersichtlich, dass eine Erwärmung von rund 0,9 °C bereits eingetreten ist.

Beim Blick in die Zukunft ist jedoch zwischen der transienten und der Gleichgewichtsreaktion des Klimas, hier der Globaltemperatur, zu unterscheiden. Transient bedeutet bis zu einem bestimmten Zeitpunkt, z.B. jetzt, während sich erst im Gleichgewicht (sofern es überhaupt erreicht, d.h. nicht ständig weiter hinausgezögert wird) alle Komponenten des Klimasystems, insbesondere Atmosphäre und Ozean, auf die jeweilige Störung, hier die anthropogene Erhöhung der atmosphärischen Treibhausgas-Konzentrationen, eingestellt haben. Dazu benötigt das System eine gewisse Zeit.

Man kann nun versuchen, abzuschätzen, welche anthropogene Temperaturreaktion im Klimasystem aufgrund der bisherigen Störung, sprich Treibhausgas-Emissionen, schon angelegt ist. Dabei hilft eine einfache Formel, wonach die Gleichgewichtsreaktion der Globaltemperatur proportional zum (bisherigen) Strahlungsantrieb ist. Der Proportionalitätsfaktor ist die sog. Klimasensitivität. Gemäß IPCC (2014) liegt die Gleichgewichtsreaktion der Globaltemperatur auf eine CO₂-Konzentrationsverdoppelung gegenüber dem vorindustriellen Niveau (wofür i.a. ein Strahlungsantrieb von ~4,4 Wm⁻² angesetzt wird) zwischen 1,5 und 4,5 °C. Das entspricht einem Klimasensitivitätsparameter zwischen rund 1/3 und 1. Diese enorme Unsicherheit lässt sich jedoch empirisch eingrenzen, da sich paläoklimatologisch, nämlich aus dem Unterschied des Klimazustands der letzten Eiszeit (Tiefpunkt vor ca. 18000 Jahren) zu heute ein Parameterwert von etwa $\frac{3}{4}$ abschätzen

lässt (Kasang, 2016; Hansen et al., 2008). Mit dem bisherigen (Industriezeitalter) Treibhausgas-Strahlungsantrieb von ca. $3,3 \text{ Wm}^{-2}$ (vgl. oben, Abschnitt 4; IPCC, 2014) folgt daraus eine zu erwartende Gleichgewichtsreaktion der Globaltemperatur von rund $2,5 \text{ }^\circ\text{C}$, also deutlich oberhalb der klimapolitischen 2-Grad-Grenze. Und das würde auch nur dann gelten, wenn ab sofort keine Treibhausgas-Emissionen mehr stattfinden würden. Dafür aber lässt sich die Klimapolitik bekanntlich (selbst nach COP21) noch mehrere Jahrzehnte Zeit. So wird der Strahlungsantrieb und somit die irgendwann zu erwartende Gleichgewichtstemperatur immer weiter über die genannten $2,5 \text{ }^\circ\text{C}$ hinaus ansteigen.

Etwas entschärft wird die Situation nur dadurch, dass es im Industriezeitalter auch negative Strahlungsantriebe gegeben hat, nämlich durch anthropogene Aerosole und Vulkanausbrüche (vgl. wiederum Abschnitt 4). Die vulkanisch verursachten Abkühlungen treten jedoch immer nur sehr kurzzeitig auf und können daher die langfristige Erwärmung letztlich nicht aufhalten (vgl. insbesondere Abb. 4 und 6). Der Aerosol-Strahlungsantrieb beinhaltet im Gegensatz zu den Treibhausgasen kaum eine Zeitverzögerung und hat bisher die Erwärmung nur um wenige Zehntel Grad verringert (vgl. Abb. 4, wonach es sogar ca. $0,5 \text{ }^\circ\text{C}$ gewesen sein könnten; physikalisch kommt man meist zu etwa $0,3 \text{ }^\circ\text{C}$, d.h. ohne Aerosolwirkung hätte die globale Erwärmung im Industriezeitalter hypothetisch bei grob geschätzt $1,2 \text{ }^\circ\text{C}$ statt $0,9 \text{ }^\circ\text{C}$ gelegen). Bemerkenswert ist in diesem Zusammenhang auch, dass das IPCC (2014) bei Erfassung aller relativ aufwändigen Klimamodellrechnungen und den Klimasensitivitätsabschätzungen (für den Fall einer CO_2 -Konzentrationsverdoppelung) im Mittel aller Modellergebnisse einen Unterschied zwischen der transienten und der Gleichgewichtsreaktion der Globaltemperatur von $1,4 \text{ }^\circ\text{C}$ ermittelt hat.

Fazit: Die klimapolitische Zielsetzung der 2-Grad-Grenze (oder gar der 1,5-Grad-Grenze) muss aus klimawissenschaftlicher Sicht als sehr unrealistisch angesehen werden. Realistischer ist es, sich im Rahmen der Klimaanpassung auf wesentlich höhere Werte einzustellen. Nach dem Climate Action Tracker (2015), einer konzertierten Aktion mehrerer Forschungseinrichtungen einschließlich des Potsdam-Instituts für Klimafolgenforschung, waren es zur Zeit von COP21 (Nov. 2015) aufgrund der bis dahin ergriffenen Maßnahmen $3,3\text{-}3,9 \text{ }^\circ\text{C}$, aufgrund der damals geplanten Maßnahmen $2,4\text{-}2,7 \text{ }^\circ\text{C}$, aber auch nur transient bis zum Jahr 2100; denn in diesem Jahr wird der Klimawandel bzw. sein anthropogener Anteil nicht beendet sein, sondern je nach der dann eingetretenen Situation einem Gleichgewichtszustand zustreben, verbunden mit weiterer Erwärmung. Bei alledem gewinnen die Überlegungen zur Anpassung an den nicht mehr vermeidbaren Klimawandel enorm an Bedeutung, aber auch die Notwendigkeit, die geplanten Klimaschutzmaßnahmen so bald wie möglich und so effektiv wie möglich durchzuführen. (Näheres zu diesem Problemkreis siehe u.a. Schönwiese, 2016).

Literatur

- Brause, R. (1995): Neuronale Netze. Eine Einführung in die Neuroinformatik. Teubner, Stuttgart.
- Climate Action Tracker (2015): Effect of current pledges and policies on global temperature. <http://climateactiontracker.org/global.html> (Abruf 20.11.2015).
- CRU (Climatic Research Unit, 2016): Global temperature anomalies. <https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/temperature/HadCRUT4-gl.dat>
- DMG (Deut. Meteorolog. Ges., Claußen, M. et al., 2015): Stellungnahme der Deutschen Meteorologischen Gesellschaft e.V. zum Klimawandel – 21-09-2015. Mitteilungen DMG, Heft 03/2015, S. 2-4.
- GISS (Goddard Institute for Space Studies, 2016): Global temperature anomalies. http://data.giss.nasa.gov/gistemp/tabledata_v3/GLB.Ts+dSST.txt

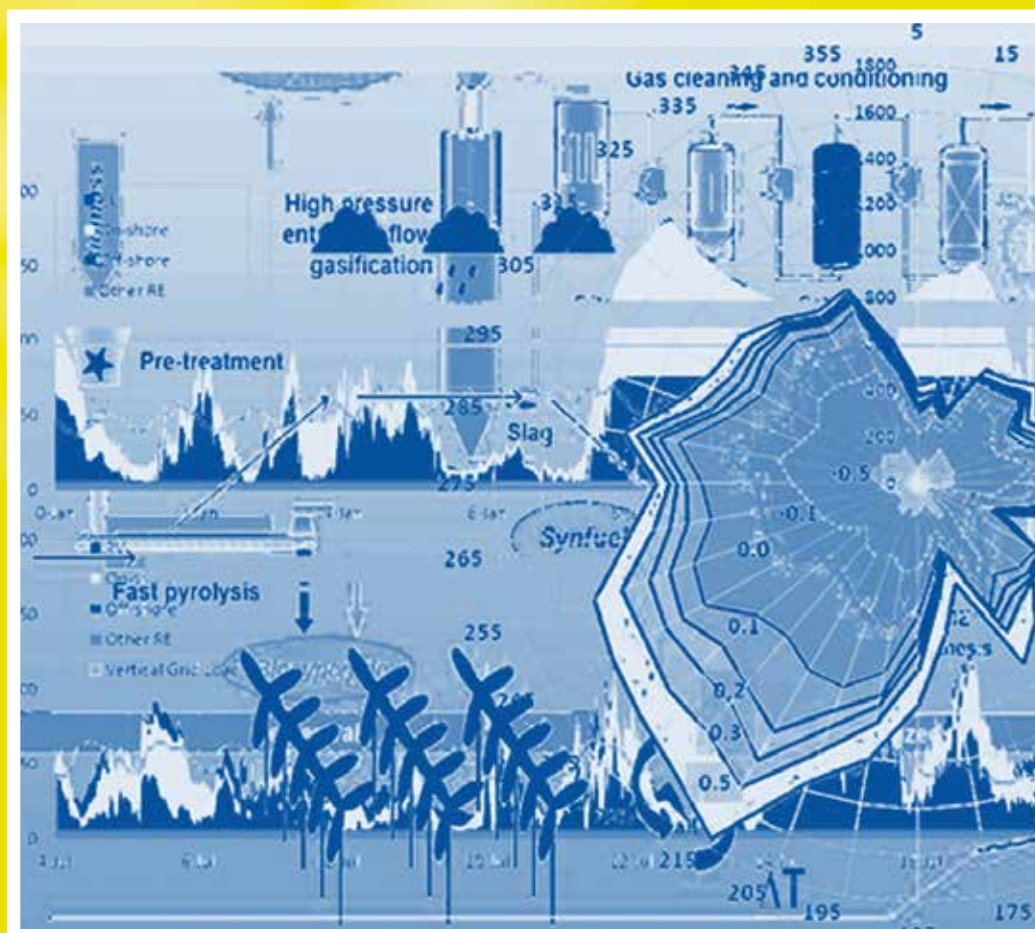
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change, Stocker, T.F., et al., eds., 2014): Climate Change 2013. The Physical Science Basis (Working Group I Contribution, Fifth Assessment Report). Cambridge Univ. Press, Cambridge.
- Hansen, J.E. et al. (2008): Target atmospheric CO₂: Where should humanity aim? http://www.columbia.edu/~jeh1/2008/TargetCO2_20080407.pdf
- Kasang, D. (2016): Das Quartär. Hamburger Bildungsserver (Abruf 13.4.2016). <http://www.bildungsserver.hamburg.de/klimageschichte/2047086/das-quartaer/>
- Kosaka, Y., Xie, S.-P. (2013): Recent global-warming hiatus tied to equatorial Pacific surface cooling. *Nature* **501**, 403-407.
- McCormick, P.M., et al. (1995): Atmospheric effects of Mt. Pinatubo eruption. *Nature* **373**, 399-404.
- Meehl, G.A. et al. (2007): Global climate projections. In IPCC (Solomon, A. et al., eds.): Climate Change 2007. The Physical Science Basis (Working Group I Contribution, Fourth Assessment Report), pp. 747-846. Cambridge Univ. Press, Cambridge.
- NOAA (Nat. Oceanic and Atmospheric Administration, 2016): Global temperature anomalies. https://www.ncdc.noaa.gov/cag/time-series/global/globe/land_ocean/ytd/12/1880-2014.csv
- Schellnhuber, H.J. (2015): Selbstverbrennung. C. Bertelsmann, München.
- Schönwiese, C.-D. (2013a): Klimatologie. Ulmer (UTB), Stuttgart.
- Schönwiese, C.-D. (2013b): Praktische Statistik für Meteorologen und Geowissenschaftler. Borntraeger, Stuttgart.
- Schönwiese, C.-D. (2016): Die klimapolitische 2-Grad-Grenze – ein Selbstbetrug? http://www.uni-frankfurt.de/60300414/Sw_2Grad.pdf
- Schönwiese, C.-D. et al. (2010): Statistical assessment of anthropogenic and natural climate forcing. An update. *Meteorol. Z., N.F.*, **19**, 3-10.
- Taylor, K.E. et al. (2012): An overview of CMIP5 and the experiment design. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* **93**, 485-498.
- Trenberth, K.E. (2015): Has there been a hiatus? *Science* **349**, 691-692.
- Walter, A. (2001): Zur Anwendung neuronaler Netze in der Klimatologie. Deut. Wetterdienst, Bericht Nr. 218, Offenbach a.M.
- WMO (World Meteorological Organization, 2015): 2015 likely to be warmest on record, 2011-2015 warmest five year period. Press Release No. 13 (25 Nov. 2015), Geneva.

Prof. Dr. Christian Schönwiese
 J.W. Goethe-Universität
 Institut für Atmosphäre und Umwelt
 Postfach 111932
 D-60054 Frankfurt a.M.

Deutsche Physikalische Gesellschaft



Arbeitskreis Energie



Energie

Forschung und Perspektiven

Vorträge auf der DPG-Frühjahrstagung
Regensburg 2016

Herausgegeben von Hardo Bruhns

Energie

Forschung und Perspektiven

Vorträge auf der DPG-Frühjahrstagung in Regensburg 2016

Arbeitskreis Energie in der Deutschen Physikalischen Gesellschaft

Herausgegeben von Hardo Bruhns

Bad Honnef, August 2016

Frühjahrstagung des Arbeitskreises Energie in der Deutschen Physikalischen Gesellschaft

Regensburg, 6. bis 9. März 2016

Haupt- und Fachvorträge

Inhaltsverzeichnis / Table of Contents

Introduction	7
Fachsitzungen / Sessions	8
Abstracts	9
Globale Klimavariabilität im Industriezeitalter – Phänomene und Ursachen - vorgetragen von Ch. Schönwiese	23
The 2°C climate policy goal: Chances & Challenges - presented by H. Held	35
The reactor accident of Fukushima Dai-ichi and its radiological consequences for the Japanese population - presented by R. Michel	53
Monolithic Perovskite/Silicon Tandem Solar Cells - presented by St. Albrecht	69
Processes for Advanced Fuel Production from Biomass - presented by J. Sauer	83
Methodische Aspekte der Systemanalyse zur Energiewende - vorgetragen von M. Robinius	95

Wasserstoff als Energieträger: Eine Systemanalyse - vorgetragen von S. Schiebahn	103
Offshore Wind Energy - Chances, Challenges, and Impact from a Meteorological Point of View - presented by S. Emeis	113
Wärmepumpe oder KWK – was passt zur Wärmewende? - vorgetragen von G. Luther	123
Impressum	140

Der vorliegende Band versammelt schriftliche Ausarbeitungen von Vorträgen auf der Tagung des Arbeitskreises Energie in der Deutschen Physikalischen Gesellschaft des Jahres 2016 in den Räumen der Universität Regensburg. Leider ist es nicht gelungen, von allen Vortragenden Manuskripte zu erhalten. Die Präsentationsfolien der meisten Hauptvorträge können auf der Webseite des Arbeitskreises über:

<http://www.dpg-physik.de/dpg/organisation/fachlich/ake.html>

(von dort gelangt man zum Archiv des AKE) eingesehen werden. Allen, die zu diesem Sammelband beigetragen haben, sei an dieser Stelle sehr herzlich gedankt.

Düsseldorf, im August 2016

Hardo Bruhns