

A dirt road leads towards a bright sun on the horizon, surrounded by a field of green grass. The sky is filled with large, dramatic clouds, some dark and some illuminated by the sun's rays. The overall scene is a mix of natural beauty and atmospheric intensity.

SONNE, TREIBHAUSGASE, AEROSOLE, VULKANAUSBRÜCHE

- gibt es einen Favoriten bei Klimaänderungen?

Impressum

Herausgeber: Umweltbundesamt
Pressestelle
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau-Roßlau
E-Mail: pressestelle@uba.de
Internet: www.umweltbundesamt.de

Autoren: Dr. Steffi Richter
Dr. Claudia Mäder

Redaktion: Fachgebiet I 2.1 - Klimaschutz

Stand: Februar 2012

Gestaltung: UBA

Titelbild: © Pavel Klimenko | www.fotolia.de

Sonne, Treibhausgase, Aerosole, Vulkanausbrüche – gibt es einen Favoriten bei Klimaänderungen?

Seit der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts erwärmt sich das Klima auf der Erde erheblich. In der Klimawissenschaft besteht folgender Konsens über die Ursachen dieser Erwärmung (IPCC 2007):

„Der größte Teil des beobachteten Anstiegs der mittleren globalen Temperatur seit Mitte des 20. Jahrhunderts ist sehr wahrscheinlich¹ durch den beobachteten Anstieg der anthropogenen² Treibhausgaskonzentrationen verursacht.“

Diese Erkenntnis, die in der jüngsten Vergangenheit mehr und mehr untermauert wurde, wird dennoch außerhalb der Wissenschaft immer wieder angezweifelt. Die Zweifler bemühen dabei verschiedenste Argumente gegen eine anthropogene Erwärmung. Besonders häufig hört man das Argument: Die Sonne verursacht die Klimaerwärmung. Andere wiederum argumentieren, dass die globale Erwärmung seit 1998 zum Stillstand gekommen sei und dass deshalb die erhöhten atmosphärischen Treibhausgaskonzentrationen nicht von Bedeutung seien.

Wir schauen uns in den folgenden Abschnitten lange Zeitreihen der Temperatur – seit der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts bis in die Gegenwart – an und diskutieren die These vom Stillstand der Klimaerwärmung. Im Anschluss erörtern wir den wissenschaftlichen Kenntnisstand zum Einfluss der Sonnenstrahlung auf das Klima.

Ist die globale Erwärmung seit 1998 zum Stillstand gekommen?

Zur Untersuchung von Klimaänderungen werten die Meteorologen die weltweiten Messungen der bodennahen Lufttemperatur aus. Mit Hilfe von Rechenverfahren interpolieren und mitteln sie diese Daten räumlich über die ganze Erde, um ein globales Mittel der Temperatur zu erhalten sowie zeitlich über ein ganzes Jahr, zum Beispiel 2011.

Nun ist das globale Temperaturmittel von 2011 allein wenig aussagekräftig. Mehr Informationen gewinnen wir aus der Abweichung des globalen Mittels von 2011 vom Mittelwert in einem zurückliegenden, längeren Zeitraum (Referenzzeitraum) – wir sehen dann, ob 2011 wärmer oder kühler als im langjährigen Durchschnitt war. Zudem benötigen wir eine Zeitreihe der globalen Mitteltemperatur, um Erkenntnisse über die

¹ In IPCC 2007 werden auf der Basis von Expertenbeurteilungen Ausdrücke für die geschätzte Wahrscheinlichkeit von Ergebnissen verwendet. Dabei bedeutet „sehr wahrscheinlich“ eine Eintrittswahrscheinlichkeit von > 90 %.

² Anthropogen bedeutet: durch den Menschen verursacht

zeitliche Änderung der Temperatur – den Trend – ableiten zu können. Die Meteorologen wählen als Referenzzeitraum beispielsweise die Jahre 1961 – 1990 und bilden aus den globalen Temperaturmitteln der einzelnen Jahre dieser Periode den 30-jährigen Mittelwert. Nun konstruieren sie eine Zeitreihe (beispielsweise von 1900 bis 2011), indem sie auf der x-Achse der Darstellung alle Jahre (von 1900 bis 2011) abtragen und auf der y-Achse für jedes einzelne Jahr die Abweichung des globalen Temperaturmittels vom Mittelwert des 30-jährigen Referenzzeitraumes.

Derartige Reihen zur Analyse der zeitlichen Entwicklung der globalen Mitteltemperatur werden von verschiedenen wissenschaftlichen Institutionen berechnet und veröffentlicht. Viel genutzt ist der Datensatz der NASA (Goddard Institute for Space Studies – **GISS**), der Datensatz der Universität von East Anglia und des Britischen Meteorologischen Dienstes (Climate Research Unit at the University of East Anglia und Hadley Center – **HadCRUT**) sowie die Zeitreihe der amerikanischen Ozean-Atmosphärenbehörde **NOAA** (National Oceanic and Atmospheric Administration).

Die Abbildung 1 zeigt die Zeitreihe der NASA, der als Referenzzeitraum zur Berechnung der Temperaturabweichungen die Periode 1951 – 1980 zugrunde liegt:

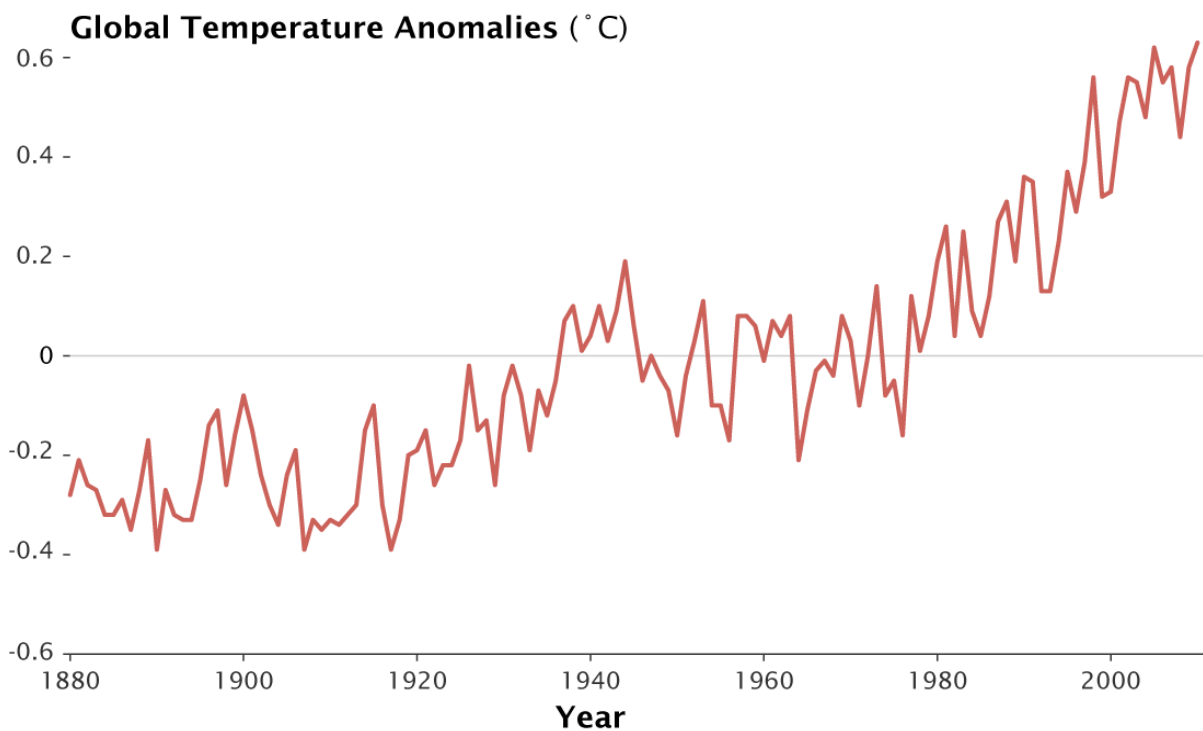


Abbildung 1: Abweichungen des globalen Mittels der bodennahen Lufttemperatur vom Mittelwert im Referenzzeitraum 1951 – 1980 (x-Achse: Jahre 1880-2010, y-Achse: Temperaturabweichung)

Quelle: <http://www.giss.nasa.gov/research/news/20110112/>

Seit Ende der 70er Jahre geht die Kurve in der Abbildung 1 steil nach oben und verdeutlicht den Trend der globalen Erwärmung. 9 der 10 wärmsten Jahre seit Beginn der Aufzeichnungen traten seit dem Jahr 2000 auf. Das Jahr 2011 rangiert laut NASA auf Platz 9 der wärmsten Jahre seit 1880 (NASA 2012a).

Die amerikanische Ozean-Atmosphärenbehörde NOAA charakterisiert die Dekade 2001 – 2010 als die wärmste seit 1880. Die Abweichung des globalen Temperaturmittels dieser Dekade vom Mittelwert im 20. Jahrhundert (1901 – 2000) beträgt $0,56^{\circ}\text{C}$. Zum Vergleich: Die Temperaturabweichung der bisher wärmsten Dekade 1991 – 2000 liegt bei $0,36^{\circ}\text{C}$ (NOAA 2011).

Bedingt durch unterschiedliche Referenzzeiträume und geringfügige Abweichungen in den Methoden zur Berechnung der globalen Mitteltemperatur sind die Zeitreihen der verschiedenen wissenschaftlichen Institute nicht ganz identisch (NASA 2011a). So weist die Temperaturreihe der Universität von East Anglia und des Britischen Meteorologischen Dienstes (HadCRUT) das Jahr 1998 als wärmstes Jahr seit Beginn der regelmäßigen Aufzeichnungen aus:

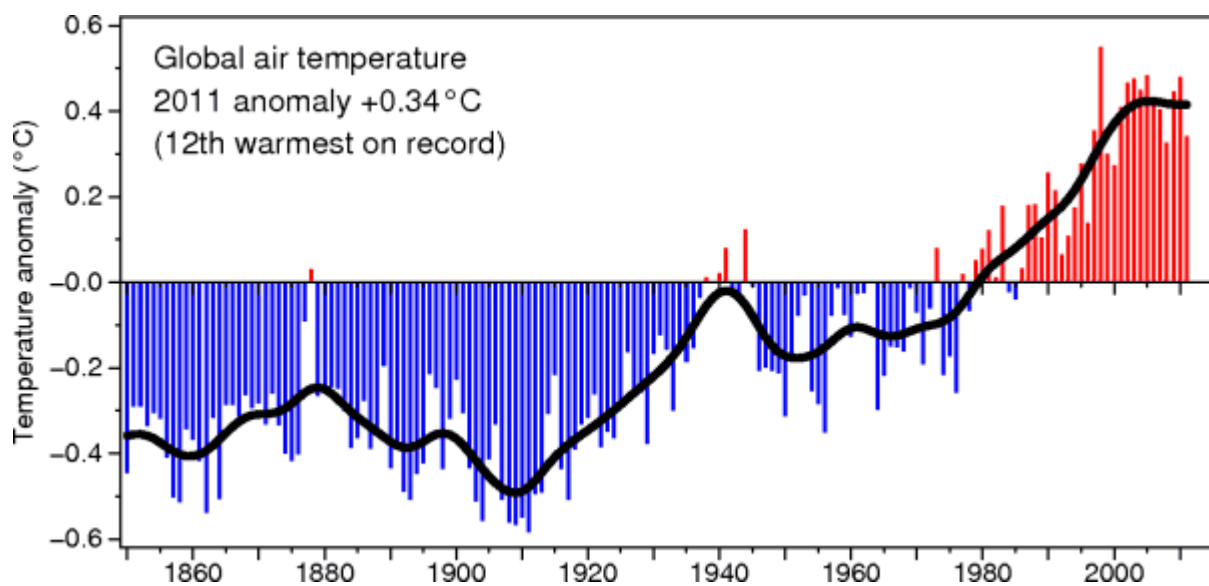


Abbildung 2: Abweichungen des globalen Mittels der bodennahen Lufttemperatur vom Mittelwert im Referenzzeitraum 1961 – 1990 (rote und blaue Balken), die durchgezogene schwarze Linie stellt den nichtlinearen Trend dar (x-Achse: Jahre 1850-2011, y-Achse: Temperaturabweichung)

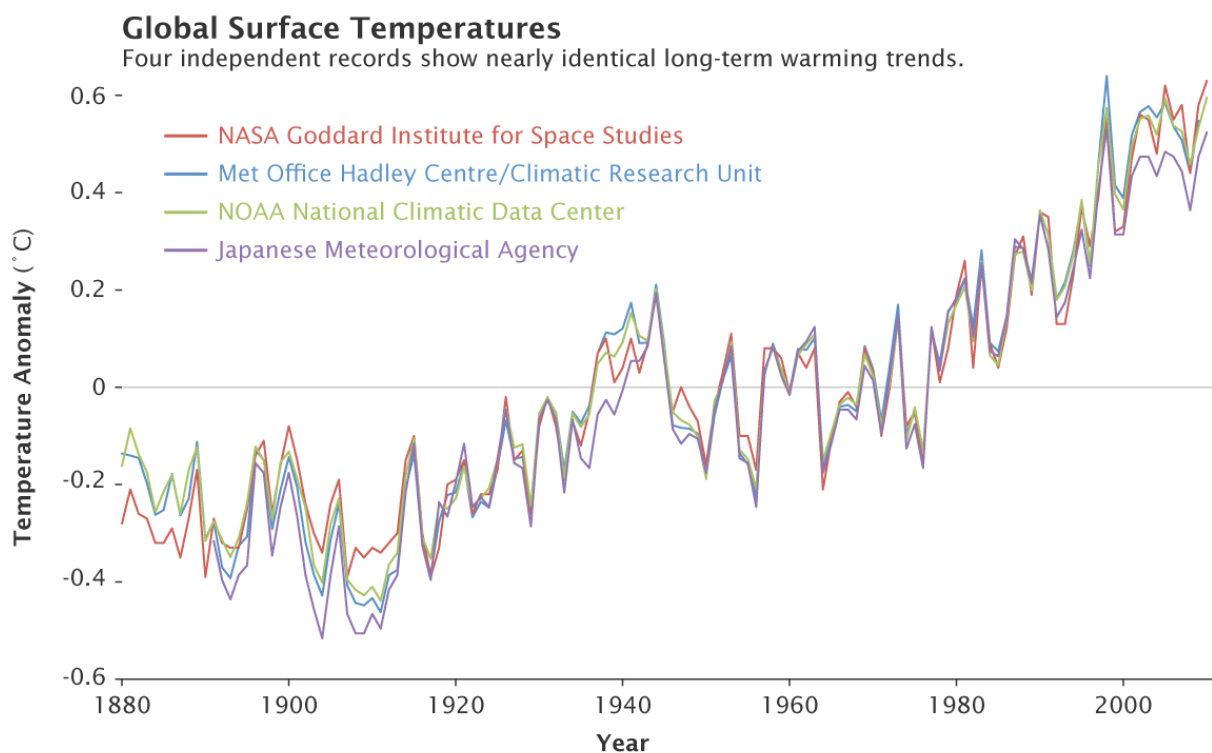
Quelle: <http://www.cru.uea.ac.uk/cru/info/warming/>

Die HadCRUT-Reihe wird verschiedentlich falsch interpretiert: Vor allem Zweifler an der anthropogenen (vom Menschen verursachten) Erwärmung betrachten isoliert den Zeitraum seit 1998 – dem wärmsten Jahr dieser Reihe – und argumentieren, die globale Erwärmung sei seit 1998 zum Stillstand gekommen. Wenn wir dieser Argumentation folgen, „lügen wir uns aus folgenden Gründen selbst in die Tasche“:

1. In der Klimatologie werden lange Zeitreihen (soweit vorhanden) und langfristige Trends untersucht. Auf langfristige Änderungen des Klimas müssen wir uns in besonderer Weise einstellen und Maßnahmen ergreifen. Die HadCRUT-Reihe in Abbildung 2 zeigt eine fortschreitende globale Erwärmung seit mehr als 30 Jahren. Das ist ein langfristiger Erwärmungstrend. Eine langfristige Stagnation der globalen Erwärmung hingegen ist nicht erkennbar. Wir können uns auf Grund der vorliegenden Daten nicht zurücklehnen und sagen: „Alles in bester Ordnung, die globale Erwärmung kommt zum Stillstand.“
2. Die vom Menschen verursachte Zunahme der Treibhausgase in der Atmosphäre bewirkt einen langfristigen Anstieg der globalen Mitteltemperatur, keine stärkeren Schwankungen von Jahr zu Jahr oder über den Zeitraum weniger Jahre. Derartige Schwankungen haben andere Ursachen. Innerhalb einer globalen Erwärmung können durchaus einige kühlere Jahre auftreten, die am langfristigen Erwärmungstrend nichts ändern. Deshalb wäre eine Handvoll kühler Jahre kein überzeugendes Argument für Zweifler an der anthropogenen Erwärmung.
3. Es gibt keinen physikalisch plausiblen Grund, das Jahr 1998 als Wendepunkt der globalen Erwärmung anzunehmen. Diesen Grund gäbe es vielleicht, wenn wir in diesem Zeitraum die atmosphärischen Treibhausgaskonzentrationen auf einem bestimmten Niveau stabilisiert hätten, mehrere große Vulkane ausgebrochen wären und eine lange – über mehrere Dekaden dauernde – Phase vornehmlich inaktiver Sonne prognostiziert worden wäre. Wohlgedenkt: diese Gründe müssten schon zusammenkommen. Denn trotz Stabilisierung der Treibhausgaskonzentrationen würde die Erwärmung zunächst andauern. Welche Abkühlung ein großer Vulkanausbruch bewirkt, sehen wir in den Abbildungen 1 und 2 deutlich am Beispiel des Pinatubo 1991. Und auch die Sonne kann das Ruder nicht herumreißen: zwischen 2005 und 2010 war die Sonnenleuchtkraft im tiefsten Minimum seit Beginn der Satellitenmessungen in den 1970er Jahren (Rahmstorf 2011, NASA 2012). Trotzdem fallen mit Ausnahme des Jahres 2008 sämtliche Jahre der Dekade 2001 – 2010 unter die 10 wärmsten Jahre seit Beginn der instrumentellen Beobachtungen (NOAA 2011).
4. Wir kennen einen wesentlichen Grund dafür, warum das Jahr 1998 besonders warm war: 1998 fand das bisher stärkste verzeichnete El Niño-Ereignis statt (Rahmstorf 2011a). El Niño (spanisch: das Christkind) ist die Warmphase einer periodisch wiederkehrenden Erwärmung und Abkühlung der Meeresoberflächentemperaturen im tropischen Pazifik. Dieses Phänomen beeinflusst in starkem Maße die atmosphärische Zirkulation und damit die Witterung weit über den tropischen Pazifik hinaus (MPG 2007, MPI 2011).

El Niño Southern Oscillation (ENSO) – wie die vollständige Bezeichnung lautet – entsteht durch die Wechselwirkung zwischen Ozean und Atmosphäre und zeigt sich in kurzfristigen Schwankungen des globalen Mittels der bodennahen Lufttemperatur. Ein besonders warmes Jahr in Zusammenhang mit einem besonders starken El Niño-Ereignis – einem natürlichen, im Abstand weniger Jahre wiederkehrenden Phänomen – ist wahrlich kein Anzeichen für eine etwaige Umkehr eines langfristigen Trends.

Kehren wir zurück zu den verschiedenen Zeitreihen des globalen Temperaturmittels. Prinzipiell kommt es in diesen Reihen weniger auf die Mitteltemperatur eines einzelnen Jahres als vielmehr auf den Temperaturtrend an. Die NASA 2011a hat die unabhängigen Datensätze von vier wissenschaftlichen Institutionen in einer Darstellung zusammengefasst:



Credit: NASA Earth Observatory/Robert Simmon

Data Sources: NASA Goddard Institute for Space Studies, NOAA National Climatic Data Center, Met Office Hadley Centre/Climatic Research Unit, and the Japanese Meteorological Agency.

Abbildung 3: Abweichungen des globalen Mittels der bodennahen Lufttemperatur vom Mittelwert im Referenzzeitraum – Zeitreihen der NASA (rot), der Universität von East Anglia und des Britischen Meteorologischen Dienstes (blau), der amerikanischen Ozean-Atmosphärenbehörde (grün) und der Japanischen Meteorologischen Behörde (violett) im Vergleich (die Referenzzeiträume sind unterschiedlich; x-Achse: Jahre 1880-2010, y-Achse: Temperaturabweichung)

Quelle: <http://www.giss.nasa.gov/research/news/20110113/>

Obwohl die Referenzzeiträume zur Berechnung der Temperaturabweichungen unterschiedlich sind und „datenleere“ Gebiete wie große Teile der Arktis bei der Berechnung der globalen Mitteltemperatur unterschiedlich behandelt werden³, sehen die Zeitreihen in der Abbildung 3 sehr ähnlich aus. Besonders der Erwärmungstrend seit Ende der 1979er Jahre taucht in allen Reihen übereinstimmend auf. Zudem verdeutlichen alle Temperaturreihen, dass die Dekade 2001 – 2010 der wärmste 10-Jahreszeitraum seit Beginn der regelmäßigen Aufzeichnungen war (NASA 2011a).

Welche Erkenntnisse gibt es über den Einfluss der Sonne auf das Klima?

Die Strahlung der Sonne ist der Energielieferant und damit der Motor des Klimas auf der Erde. Folgerichtig können Änderungen der Sonnenstrahlung Klimaänderungen bewirken. Aber was wissen wir eigentlich über die Schwankungen der Sonnenstrahlung?

Die Leuchtkraft der Sonne ändert sich in sehr langen, mittelfristigen und auch in sehr kurzen Zeiträumen. Im Laufe ihres Lebens dehnt sich die Sonne aus und wird immer heißer. Deshalb nehmen die Leuchtkraft der Sonne und damit der solare Energiefluss langfristig stetig zu. Vor ungefähr 3,5 Milliarden Jahren, als sich das Leben auf der Erde entwickelte, war der solare Energiefluss etwa 35 % schwächer als in der heutigen Zeit (Clausen 2003).

Zyklische Schwankungen der Sonnenstrahlung

Abgesehen von der Änderung über Milliarden von Jahren schwankt die Sonnenstrahlung zudem in kürzeren Zeiträumen. Die Wissenschaftler haben Zyklen gefunden, die von Dekaden bis hin zu einigen Jahrtausenden reichen (Clausen 2003).

Auch wenn sich die Parameter der Erdbahn um die Sonne ändern, kommt es zu Veränderungen der Sonneneinstrahlung an der Erdoberfläche. Die dominanten Perioden der Erdbahnzyklen – die sogenannten Milankovitch-Zyklen - betragen 23.000, 41.000, 100.000 und 400.000 Jahre und treten in den meisten langen Klimazeitreihen deutlich hervor (Rahmstorf und Schellnhuber 2007). Diese Zyklen verursachten nach gegenwärtigen Erkenntnissen die periodisch wiederkehrenden Eiszeiten, die vor zwei bis drei Millionen Jahren begannen. Interessant ist, dass die Milankovitch-Zyklen die gesamte, auf der Erde ankommende Strahlungsmenge kaum ändern, sondern lediglich die Verteilung über die Breitengrade und Jahreszeiten (Rahmstorf und Schellnhuber 2007).

³ In einigen Teilen der Welt wie zum Beispiel den ozeanischen Gebieten der Arktis gibt es nur wenige Wetterstationen und damit nur wenige Temperaturmessungen. Die NASA füllt diese Lücken mit Temperaturbeobachtungen der nächstgelegenen Landstationen und bezieht diese in die Berechnung des globalen Temperaturmittels mit ein. In den Temperaturreihen von HadCRUT und NOAA hingegen sind Gebiete des arktischen Ozeans ohne Temperaturmessungen ausgespart. Dadurch entstehen Abweichungen in den Temperaturreihen.

Eines der wesentlichen Probleme bei der Untersuchung des Einflusses der Sonnenstrahlung auf das Klima ist das Fehlen von exakten Messwerten. Immerhin verfügen die Wissenschaftler für einen Teil des letzten Jahrtausends bereits über Messungen, also direkte Beobachtungen sowohl meteorologischer Größen als auch der Sonnenstrahlung. Erste Messungen der bodennahen Lufttemperatur im Rahmen von Beobachtungsnetzen gehen in das 17. Jahrhundert zurück. Für Zeiträume, in denen keine Messwerte vorliegen, verwenden die Wissenschaftler indirekte Klimazeugen, sogenannte Proxydaten. Dazu zählen beispielsweise Baumringe, Pollen, Eisbohrkerne oder Hinweise auf Gletscherstände. Aber auch historische Quellen, Ernteertragszahlen, phänologische Phasen⁴ und Hochwasserangaben lassen Rückschlüsse auf das Klima früherer Zeiten zu.

Der solare Energiefluss (Englisch: TSI – Total Solar Irradiance) wird erst seit 1977 kontinuierlich von Satelliten aus gemessen. Für die Zeit davor kommen Beobachtungen der Sonnenfleckenzahl – die proportional zur Sonnenaktivität ist – zur Anwendung. Diese Beobachtungen begannen mit der Erfindung des Teleskops um 1610 und mündeten etwa 100 Jahre später in zuverlässigen, regelmäßigen Beobachtungen. Im Hinblick auf noch weiter zurückliegende Zeiträume schließen die Wissenschaftler aus dem Vorhandensein bestimmter Isotope, wie eines Berylliumisotops (¹⁰Be) und eines Kohlenstoffisotops (¹⁴C) auf die Sonnenaktivität (Gray u.a. 2010).

Die vorliegenden direkten Beobachtungen und Proxydaten des solaren Energieflusses verdeutlichen regelmäßige Zyklen, in denen die Aktivität der Sonne schwankt. Dank der direkten Satellitenmessungen ist der 11-Jahreszyklus besonders gut quantifiziert. Die Schwankungen des Energieflusses zwischen dem solaren Maximum und dem solaren Minimum des 11-Jahreszyklus liegen – umgerechnet auf die Erdoberfläche – bei 0,07 %. Das ist ein sehr geringer Wert (Gray u.a. 2010).

Weitere Sonnenzyklen betragen 80 bis 90 Jahre (Gleissberg-Zyklus), 208 Jahre (de Vries- oder Suess-Zyklus), 2300 Jahre (Hallstatt-Zyklus) und andere (Gray u.a. 2010).

Das Maunder-Minimum und die „Kleine Eiszeit“

Die historischen Sonnenfleckeneobachtungen zeigen darüber hinaus, dass der 11-Jahreszyklus der Sonne im späten 17. Jahrhundert unterbrochen war (Rahmstorf und Feulner 2011). Im Zeitraum von mehreren Dekaden waren so gut wie keine Sonnenflecken vorhanden. Diese Periode, deren Ursachen die Sonnenphysiker bisher nicht erklären können, wird als Maunder-Minimum bezeichnet und etwa von 1645 bis 1715 datiert. Das Maunder-Minimum fällt zeitlich mit einer kühlen Periode im 17. und 18. Jahrhundert zusammen. Während dieser sogenannten „Kleinen Eiszeit“ traten – zumindest in Teilen der Nordhalbkugel – lange, kalte Winter und kühle, niederschlagsreiche Sommer auf.

⁴ Wachstumsstufen von Pflanzen, zum Beispiel Zeitpunkt des Eintritts der Blüte usw.

Die Vermutung liegt nahe, dass das Maunder Minimum eine der Ursachen der „Kleinen Eiszeit“ war. Allerdings gab es in diesem Zeitraum auch weitere Faktoren, die kühlend auf das Klima wirkten. Dazu zählen größere Vulkanausbrüche, eine Abnahme der atmosphärischen Treibhausgaskonzentrationen und der langsame Rückgang der sommerlichen Sonneneinstrahlung auf der Nordhalbkugel durch die Veränderung der Erdbahnparameter (Rahmstorf und Feulner 2011). Da für die „Kleine Eiszeit“ keine direkten Messungen des solaren Energieflusses und auch keine, oder nur unzureichende Messungen der Lufttemperatur vorliegen, ist die Erforschung der Ursachen dieser kühlen Periode schwierig. In der wissenschaftlichen Literatur weichen die Angaben über den solaren Energiefluss während des Maunder-Minimums voneinander ab. Feulner 2011 führte Simulationen mit einem gekoppelten Ozean-Atmosphären-Klimamodell⁵ durch - unter Vorgabe verschiedener Werte des solaren Energieflusses und unter Einbeziehung der veränderten Treibhausgaskonzentrationen sowie der Aerosolzunahmen durch Vulkanausbrüche. Aus dem Vergleich der Modellergebnisse mit Daten indirekter Klimazeugen – Proxydaten – schloss er, dass der solare Energiefluss während des Maunder-Minimums nur geringfügig unter den heutigen Werten lag. Darüber hinaus kam Feulner zu dem Ergebnis, dass die schwächere Sonne nicht der bestimmende Faktor für die „Kleine Eiszeit“ war. Um diese Erkenntnis zu untermauern, sind jedoch weitere Untersuchungen mit Klimamodellen erforderlich.

Wie wirkt sich der 11-Jahreszyklus der Sonne auf das Klima aus?

Da die Wissenschaftler hinsichtlich des 11-Jahreszyklus seit mehr als 30 Jahren über Messwerte verfügen, haben sie den Einfluss dieser solaren Schwankung auf das Klima besonders intensiv untersucht. Eine Vielzahl von Veröffentlichungen liegt zu dieser Thematik vor. Oben haben wir bereits erwähnt, dass der Unterschied zwischen solarem Maximum und solarem Minimum des 11-Jahreszyklus gering ist. Ein deutlicher Einfluss auf das globale Klima ist deshalb wenig wahrscheinlich (es sei denn, verstärkende Rückkopplungen würden stattfinden). Zusammenhänge mit Schwankungen des regionalen Klimas sind dagegen wahrscheinlicher. So fanden die Klimaforscher Einflüsse auf regionale Temperaturen, Windverhältnisse, Wolkenbedeckungen, Niederschläge und Ozonkonzentrationen. Viele dieser Schwankungen sind jedoch sehr schwach ausgeprägt und auch nicht sicher, was die Ursache angeht. Eine umfangreiche Zusammenstellung und Diskussion derartiger Untersuchungen enthält der Übersichtsartikel von Gray u.a. 2010. Wir gehen in den folgenden Absätzen nur auf wenige Beispiele ein.

Besonders deutlich macht sich der 11-Jahreszyklus der Sonne in der Stratosphäre⁶ bemerkbar. Die Sonnenstrahlung setzt sich aus Strahlung verschiedener Wellenlängen

⁵ Mit einem gekoppelten Ozean-Atmosphären-Klimamodell werden die Prozesse in der Atmosphäre und im Ozean sowie deren Wechselwirkungen simuliert.

⁶ Als Stratosphäre wird die oberhalb der untersten atmosphärischen Schicht – der Troposphäre – gelegene Schicht bezeichnet. Sie erstreckt sich etwa zwischen 12 und 50 Kilometern Höhe und enthält Ozon führende Schichten – die sogenannte stratosphärische Ozonschicht.

zusammen. Dazu zählt hauptsächlich Strahlung im sichtbaren Bereich, aber auch im kurzwelligeren Bereich, der Ultraviolett (UV) – Strahlung. Und gerade die UV-Strahlung schwankt im 11-Jahreszyklus merklich, je nach Wellenlänge bis zu 6 %. Da UV-Strahlung zur Bildung von Ozon in der Stratosphäre führt, kommt es während des solaren Maximums zu verstärkter Ozonproduktion. Die Folge ist eine Erhöhung der stratosphärischen Temperaturen, denn Ozon wirkt erwärmend. In der oberen Stratosphäre wurden Erwärmungen um bis zu 2 °C festgestellt (Gray u.a. 2010).

Im Mittelpunkt einer Reihe von Untersuchungen steht der Einfluss des 11-jährigen Sonnenzyklus auf die bodennahe Lufttemperatur. Da die Lufttemperatur durch viele weitere Faktoren beeinflusst wird, sind die Ergebnisse derartiger Studien meist mit gewissen Fragezeichen behaftet. Die Wissenschaftler fanden unter anderem Änderungen der Meeresoberflächentemperaturen in bestimmten Regionen. Das betrifft beispielsweise die tropischen Ozeane, wo die Einstrahlung besonders stark ist.

Meehl u.a. 2009 schlagen einen komplexen Mechanismus vor, über den beide Prozesse – die verstärkte Ozonbildung in der Stratosphäre und die stärkere Einstrahlung über den tropischen Ozeanen – wechselwirken. Diese Wechselwirkung führt zu einer stärkeren Änderung bestimmter Luftbewegungen (der Zirkulation) in den Tropen und Subtropen, die die Witterung weit über dieses Gebiet hinaus beeinflusst. Meehl u.a. 2009 gelang es, die beschriebenen Prozesse in einem gekoppelten Ozean - Atmosphären –Klimamodell zu simulieren. Sie berechneten damit höhere Änderungen der Temperaturen in Bodennähe, als aus den geringen Schwankungen des solaren Energieflusses des 11-Jahreszyklus eigentlich zu erwarten wären. Wenn sich diese Erkenntnisse in weiteren Studien und Modellsimulationen bestätigen ließen, wäre ein Mechanismus gefunden, der den Einfluss des 11-Jahreszyklus der Sonne verstärkt.

Ein weiterer möglicher Verstärkungsmechanismus, der besonders von den Zweiflern an der anthropogenen Erwärmung viel zitiert wurde, ist der Einfluss kosmischer Strahlung auf die Wolkenbildung und den Bedeckungsgrad mit Wolken. Je geringer die Sonnenaktivität ist, desto mehr kosmische Strahlung dringt in die Erdatmosphäre ein. Die kosmische Strahlung produziert Ionen (geladene Teilchen) in der Troposphäre⁷, denen verschiedene Wirkungen zugeschrieben werden. Eine dieser Wirkungen beinhaltet die Bildung sehr kleiner Partikel, die zu Wolkenkondensationskernen⁸ heranwachsen und somit zu verstärkter Wolkenbildung führen könnten. Tiefe, aus Wassertröpfchen bestehende Wolken reflektieren Sonnenlicht und wirken deshalb abkühlend. Im Falle einer verstärkten Bildung von tiefen Wolken würde ein abkühlender Effekt entstehen.

Der beschriebene Effekt ist jedoch bisher mit viel mehr Fragezeichen als mit handfesten Erkenntnissen versehen. Die von Marsh und Svensmark 2003 gefundene hohe Korrelation zwischen kosmischer Strahlung und der Bedeckung mit tiefen Wolken gilt nur für das

⁷ Die Troposphäre ist die unterste Schicht der Atmosphäre und erstreckt sich im Mittel bis 12 Kilometer Höhe.

⁸ Wolkenkondensationskerne sind Partikel oder Teilchen, an denen der Wasserdampf kondensiert. Auf diese Weise entstehen Wolkenröpfchen.

kurze Zeitfenster von 1983 bis 1994, danach nicht mehr (Gray u.a. 2010). Darüber hinaus deutet eine hohe Korrelation zwischen Größen zwar darauf hin, dass ein ursächlicher Zusammenhang bestehen kann, aber nicht muss. Im Hinblick auf so komplexe Mechanismen wie eine eventuelle Beeinflussung des Wolkenbedeckungsgrades durch kosmische Strahlung müssen die physikalischen Grundlagen untersucht werden. Bisher gibt es jedoch keine ausreichende physikalische Beschreibung der mit dem vorgeschlagenen Mechanismus zusammenhängenden Prozesse.

Weiteren Aufschluss erhoffen die Wissenschaftler von dem seit 2006 am Europäischen Kernforschungszentrum CERN durchgeführten Projekt „CLOUD“. Im Mittelpunkt des Projekts steht die experimentelle Untersuchung des Einflusses kosmischer Strahlung auf die Bildung von Kondensationskernen in der Atmosphäre. In einem großen Behälter, einer sogenannten Nebelkammer, werden die atmosphärischen Bedingungen simuliert. Kirby u.a. 2011 veröffentlichten erste Ergebnisse des Projekts. Die Forscher konnten tatsächlich einen beachtlichen verstärkenden Effekt der ionisierend wirkenden kosmischen Strahlung auf die Zusammenballung von bestimmten Aerosolpartikeln⁹ in der Nebelkammer nachweisen. Allerdings sind die entstandenen Aerosolpartikel viel zu klein, um als Wolkenkondensationskerne wirksam werden zu können. Eine ganze Palette von Fragen bleibt – trotz dieser interessanten Resultate - immer noch offen:

- Wachsen die kleinen Aerosolpartikel wirklich zu den – viel größeren – Wolkenkondensationskernen heran?
- Kommt es zur deutlichen Änderung der Gesamtzahl an Wolkenkondensationskernen?
- Ändern sich im Falle einer Zunahme der Wolkenkondensationskerne die Eigenschaften der Wolken und werden mehr (vor allem tiefe) Wolken gebildet?
- Resultiert im Falle der Änderung der Wolkeneigenschaften und der Bedeckung mit Wolken ein merklicher Effekt auf das Klima?

Fassen wir die gegenwärtigen wissenschaftlichen Erkenntnisse zur Auswirkung des 11-Jahreszyklus der Sonne auf das Klima zusammen: Die Wissenschaftler fanden deutliche Einflüsse auf das regionale Klima, während die Wirkung auf das globale Klima gering ist. Für den Einfluss der kosmischen Strahlung auf die Bedeckung mit und die Eigenschaften von Wolken gibt es bisher keinen und für das Wirken eines von Meehl u.a. 2009 vorgeschlagenen Verstärkungsmechanismus keinen ausreichenden Beleg. Der Einfluss des 11-Jahreszyklus auf die globale Mitteltemperatur in Bodennähe wird mit maximal $\pm 0,1$ °C abgeschätzt (Hoffmann 2007, 2009).

⁹ Aerosole sind schwebende, feste oder flüssige Teilchen

Welche Faktoren bestimmten das Klima im 20. Jahrhundert?

Unterschiedliche Modellsimulationen unter Zugrundelegung von Beobachtungsdaten und aller bekannter Einflüsse auf das Klima (solarer Energiefluss, Treibhausgaskonzentrationen, Vulkanausbrüche, Aerosolkonzentrationen) ergeben, dass der größte Teil der globalen Erwärmung in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts durch natürliche Faktoren hervorgerufen wurde, woran eine Erhöhung des solaren Energieflusses den größten Anteil hatte (Gray u.a. 2010). Diese Untersuchungen verdeutlichen darüber hinaus, dass im späten 20. und dem frühen 21. Jahrhundert die steigenden atmosphärischen Treibhausgaskonzentrationen der entscheidende Faktor für die globale Erwärmung waren. Die Auswertungen der letzten 20 Jahre belegen einen schwachen Einfluss der Änderung des solaren Energieflusses auf das Klima (Gray u.a. 2010).

In der Abbildung 4 sind die Ergebnisse von Simulationen mit Klimamodellen den Beobachtungsdaten gegenübergestellt. Die dicke schwarze Linie in beiden Teilen der Abbildung repräsentiert die Beobachtungsdaten. Dargestellt ist die Abweichung des globalen Temperaturmittels vom Mittelwert im Zeitraum 1901-1950. Die dünnen gelben Linien im oberen Bild der Abbildung sind Ergebnisse aus 58 Simulationen mit 14 unterschiedlichen Klimamodellen, die sowohl natürliche als auch anthropogene (durch den Menschen verursachte) Einflüsse auf das Klima zugrunde legen (gleichfalls dargestellt als Abweichung vom Mittelwert im Zeitraum 1901-1950). Die rote Kurve ist das Ensemblemittel dieser Simulationen. Im Vergleich dazu zeigt das untere Bild in Form der dünnen blauen Linien die Ergebnisse von 19 Simulationen mit 5 verschiedenen Klimamodellen unter ausschließlicher Zugrundelegung natürlicher Einflüsse (ohne erhöhte Treibhausgaskonzentrationen). Die dicke blaue Linie stellt das Ensemblemittel dieser Rechnungen dar. Die vertikalen grauen Linien geben die Zeitpunkte größerer Vulkanausbrüche an (Gray u.a. 2010, IPCC 2007, Stott u.a. 2006).

Im oberen Bild der Abbildung sehen wir – besonders ab den 60er Jahren des vorigen Jahrhunderts - eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Beobachtungsdaten und Ensemblemittel der Modellsimulationen (mit allen bekannten Einflüssen auf das Klima). Die Modellrechnungen mit natürlichen Klimaeinflüssen (wie Änderungen des solaren Energieflusses, Vulkanausbrüche) hingegen stimmen ab den 60er Jahren weniger gut mit den Beobachtungsdaten überein, um etwa ab Ende der 70er Jahre stark auseinanderzudriften. Klimamodelle enthalten den gegenwärtigen Stand des Wissens über die physikalischen und chemischen Prozesse in der Atmosphäre. Der Stand von Physik und Chemie der Atmosphäre lässt nur folgende Erkenntnis zu: Zumindest seit Ende der 70er Jahre ist die Änderung der bodennahen, globalen Mitteltemperatur mit natürlichen Einflüssen allein – wie der Änderung des (seit dieser Zeit auch gemessenen) solaren Energieflusses – nicht zu erklären. Nur unter Einbeziehung aller bekannter Einflüsse auf das Klima einschließlich der durch den Menschen verursachten Treibhausgase in der Atmosphäre kann die beobachtete Klimaerwärmung von Seiten der Theorie reproduziert werden.

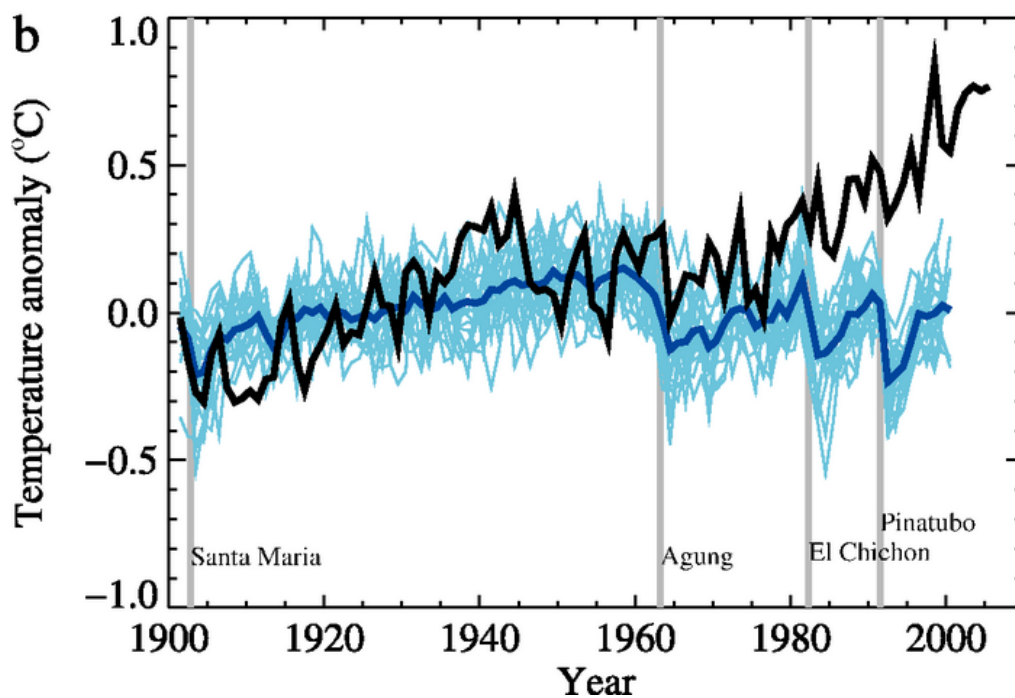
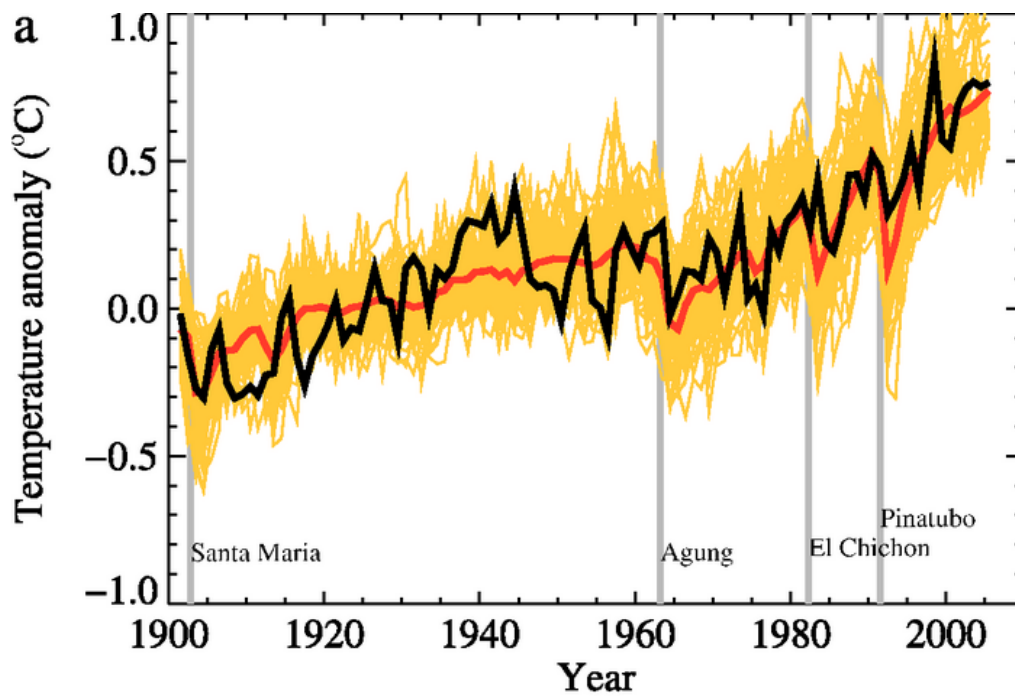


Abbildung 4: Darstellung der Ergebnisse von Klimamodellen unter Zugrundelegung natürlicher und anthropogener Einflussfaktoren (oben) und unter ausschließlicher Berücksichtigung natürlicher Einflussfaktoren (unten) im Vergleich zu den Beobachtungsdaten (dicke schwarze Linie). Dargestellt sind jeweils die Abweichungen des globalen Temperaturmittels vom Mittelwert im Zeitraum 1901-1950

Quelle: IPCC 2007, Abb. 9.5, http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/en/figure-9-5.html

Schlussbemerkung

Das Klima auf der Erde wird durch viele Faktoren beeinflusst: Dazu zählen der solare Energiefluss und der atmosphärische Gehalt an Treibhausgasen und Aerosolen. Darüber hinaus gibt es auch eine interne Klimavariabilität, die durch Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Subsystemen des Klimasystems – wie der Atmosphäre und dem Ozean – entsteht¹⁰. Diese Faktoren und Prozesse wirken – in unterschiedlicher Stärke - oft gleichzeitig und überlagern sich in der Wirkung. Schließlich reagiert das Klima intern noch mit Rückkopplungen – der Verstärkung oder Abschwächung von Prozessen. All das macht die Suche nach den Ursachen von Klimaänderungen sehr kompliziert. Auf der Grundlage von Simulationen mit Klimamodellen und auf der Basis statistischer Untersuchungen wie von Grieser u.a. 2000 und Schönwiese u.a. 2010 setzte sich in der jüngeren Vergangenheit folgender wissenschaftlicher Kenntnisstand durch: Der größte Teil der globalen Erwärmung in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts wurde durch natürliche Klimafaktoren verursacht. Seit dem letzten Drittel des 20. Jahrhunderts hingegen sind die steigenden atmosphärischen Treibhausgaskonzentrationen der bestimmende Faktor für die beobachtete globale Erwärmung.

¹⁰ Ein Beispiel für eine interne Klimaschwankung ist das im Abschnitt 1 erwähnte ENSO-Phänomen.

Literatur

Clausen, M., 2003: "Klimaänderungen: Mögliche Ursachen in Vergangenheit und Zukunft". UWSF 15 (1), S.21 - 30

Feulner, G., 2011: Are the most recent estimates for Maunder Minimum solar irradiance in agreement with temperature reconstructions? Geophys. Res. Lett., 38, L16706,

doi:10.1029/2011GL048529.

<http://www.pik-potsdam.de/aktuelles/pressemitteilungen/study-on-the-little-ice-age-low-solar-activity-just-marginally-cools-the-climate>

Gray, L. J., Beer, J., Geller, M., Haigh, J. D., Lockwood, M., Matthes, K., Cubasch, U., Fleitmann, D., Harrison, G., Hood, L., Luterbacher, J., Meehl, G. A., Shindell, D., van Geel, B., White, W., 2010: Solar influences on climate. Reviews of Geophysics, 48, RG4001, S. 1 – 53

Grieser, J., Staeger, T., Schönwiese, C., 2000: Statistische Analysen zur Früherkennung globaler und regionaler Klimaänderungen aufgrund des anthropogenen Treibhauseffektes. Abschlussbericht zum Forschungsprojekt 297 41 132, Umweltbundesamt, 228 S.

Hoffmann, G., 2007: Here comes the sun. <http://primaklima.blogg.de/eintrag.php?id=10>

Hoffmann, G., 2009: Ist der Einfluss der Sonne auf das Klima endlich demonstriert?

<http://www.scienceblogs.de/primaklima/2009/09/ist-der-einfluss-der-sonne-auf-das-klima-endlich-demonstriert.php>

IPCC 2007: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.), Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Kirby, J. u.a., 2011: Role of sulphuric acid, ammonia and galactic cosmic rays in atmospheric aerosol nucleation. Nature 476, S. 429 – 433, doi: 10.1038/nature10343

Marsh, N., Svensmark, H., 2003: Galactic cosmic ray and El Niño Southern Oscillation trends in International Satellite Cloud Climatology ProjectD2 low-cloud properties. J. Geophys. Res. 108(D6), 4195, doi:10.1029/2001JD001264

Meehl, G. A., Arblaster, J. M., Matthes, K., Sassi, F., van Loon, H., 2009: Amplifying the Pacific climate system response to a small 11-year solar cycle forcing. Science, Vol. 325 Nr. 5944, S. 1114-1118 DOI: 10.1126/science.1172872

MPG 2007: El Niño, La Niña, globale Auswirkungen.

http://www.atmosphere.mpg.de/enid/2__Kreisläufe__Windsysteme/-_El_Niño_1pf.html

MPI 2011: El Niño / La Niña.

<http://www.mpimet.mpg.de/aktuelles/presse/faq-haeufig-gestellte-fragen/das-el-niño-southern-oscillation-enso-phaenomen.html>

NASA 2011: NASA Research Finds 2010 Tied for Warmest Year on Record.

<http://www.giss.nasa.gov/research/news/20110112/>

NASA 2011a: Despite Subtle Differences, Global Temperature Records in Close Agreement.

<http://www.giss.nasa.gov/research/news/20110113/>

NASA 2012: Earth's Energy Budget Remained Out of Balance Despite Unusually Low Solar Activity.

<http://www.giss.nasa.gov/research/news/20120130b/>

NASA 2012a: NASA Finds 2011 Ninth Warmest Year on Record.
<http://www.giss.nasa.gov/research/news/20120119/>

NOAA 2011: State of the Climate, Global Analysis, Annual 2010.
<http://www.ncdc.noaa.gov/sotc/global/2010/13>

Rahmstorf, S., 2011: 2010 wärmstes und nassestes Jahr weltweit seit Beginn der Aufzeichnungen.
<http://www.wissenslogs.de/wblogs/blog/klimalounge/klimadaten/2011-01-13/2010-waermstes-und-nassestes-jahr-weltweit-seit-beginn-der-aufzeichnungen>

Rahmstorf, S., 2011a: Globale Temperatur 2010.
<http://www.wissenslogs.de/wblogs/blog/klimalounge/klimadaten/2010-12-19/globale-temperatur-2010>

Rahmstorf, S., Feulner, G., 2011: Fällt die Sonne in ein neues Maunder-Minimum?
<http://www.scilogs.de/wblogs/blog/klimalounge/klimadaten/2011-06-15/faellt-die-sonne-in-ein-neues-maunder-minimum>

Rahmstorf, S., Schellnhuber, H. J., 2007: „Der Klimawandel.“ Verlag C. H. Beck oHG, München, 144 S.

Schönwiese, C-D., Walter, A., Brinckmann, S., 2010: Statistical assessment of anthropogenic and natural global climate forcing. An update. Meteorol. Z. 19, S. 3 - 10.

Stott, P. A., Mitchell, J. F. B., Allen, M. R., Delworth, T. L., Gregory, J. M., Meehl, G. A., Santer, B. D., 2006: Observational constraints on past attributable warming and predictions of future global warming. J. Climate, 19, S. 3055–3069. doi: <http://dx.doi.org/10.1175/JCLI3802.1>