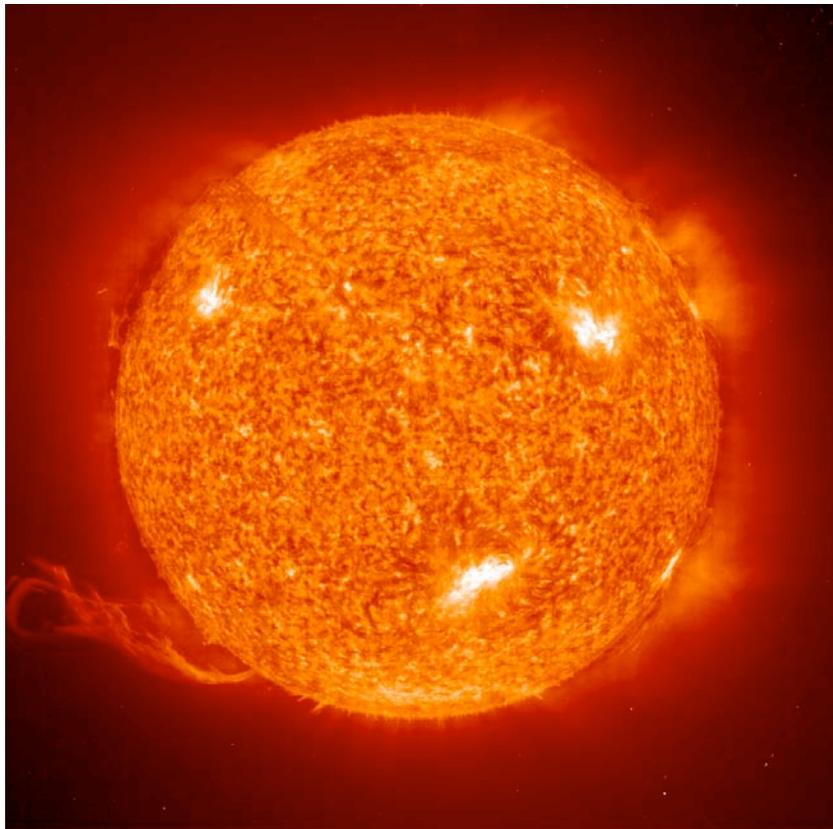


Ist die Sonne schuld am Klimawandel?

Heinz Wanner*



*Heinz Wanner, Oeschger-Zentrum für Klimaforschung der Universität Bern
Zähringerstrasse 25, CH-3012 Bern (E-Mail: wanner@oeschger.unibe.ch)

Ist die Sonne schuld am Klimawandel?

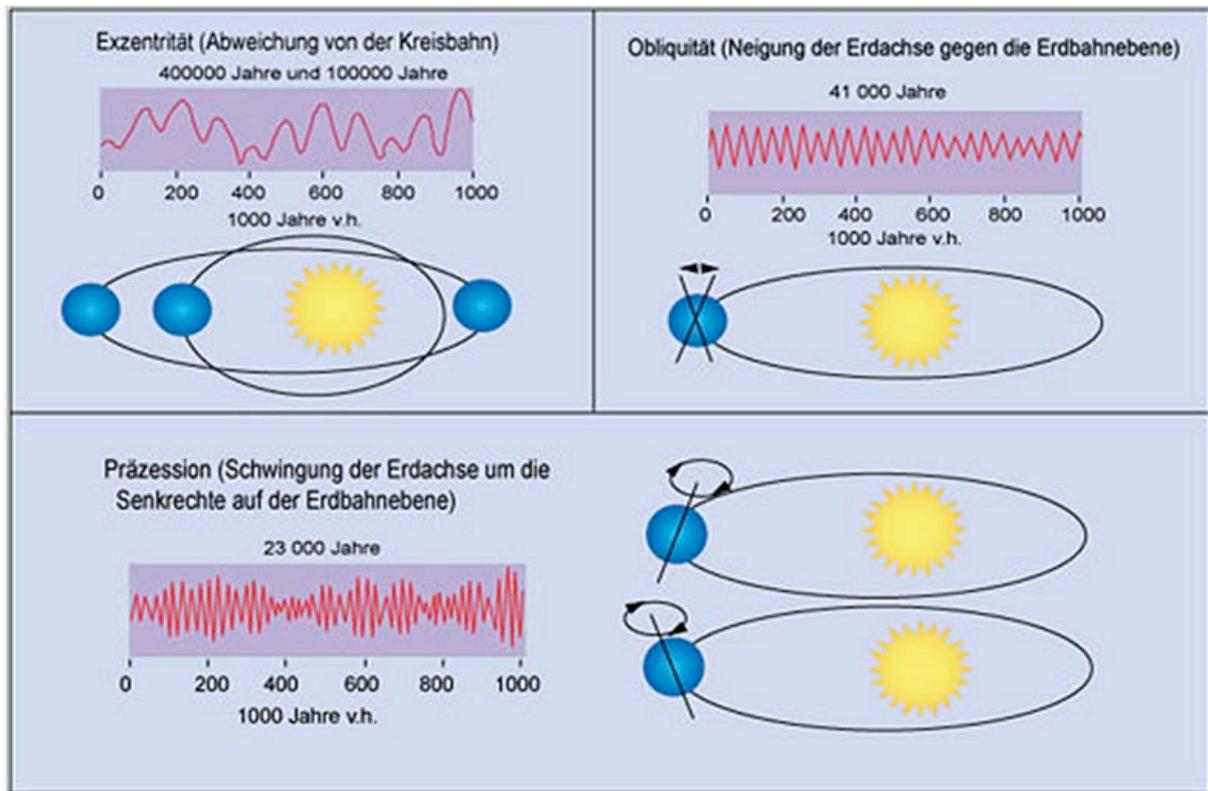
Die Abwägung der wichtigen natürlichen und menschgemachten Einflüsse zeigt eine klare und zunehmende Dominanz des Treibhauseffektes

Heinz Wanner¹

Alle paar Jahre erscheinen populäre Bücher oder Blogs, welche ausschliesslich die Sonne für den Klimawandel verantwortlich machen (vgl. Vahrenholt und Lüning 2012: Die kalte Sonne. Verlag.Hoffmann und Campe, Hamburg). Dies scheint zu überzeugen, weil das Klimasystem der Erde durch die Energieleistung der Sonne angetrieben wird. Allerdings berücksichtigen diese Schriften oft nicht, dass sich die Mischung der natürlichen und menschgemachten Antriebs- und Störungsfaktoren dauernd verändert. Dadurch wird nicht nur die Energiebilanz der Erde beeinflusst. Auch die atmosphärische Zirkulation, die Temperatur und der Niederschlag sind dauernden Schwankungen unterworfen. Die durch die Sonneneinstrahlung erzeugte Energieleistung pro Fläche (im Fachausdruck Energieflussdichte genannt) wird in Watt pro m² ausgedrückt. Bezogen auf den Einfluss der Sonne müssen zwei verschiedene Einflussfaktoren unterschieden werden. Einerseits betrifft dies die langfristige räumliche Veränderung der Energieleistung auf unserer Erdkugel aufgrund der sich verändernden Elemente der Erdbewegung (elliptische Bahn um die Sonne, Schiefe und Kreiselbewegung der Erdachse; siehe Figur 1). Andererseits müssen die Schwankungen der Strahlungsleistung der Sonne - einfach ausgedrückt sind dies die Schwankungen der Leuchtstärke der „Sonnenlampe“ - beachtet werden.

Zeitskala von Jahrhunderttausenden (Figur 1)

Auf der langfristigen Zeitskala ist die erdbahnbedingte Schwankung und Umverteilung der solaren Energieleistung zwischen den Hemisphären der entscheidende Faktor. Die elliptische Bahn der Erde um die Sonne verändert sich periodisch mit Zeitskalen von 400'000 und 100'000 Jahren (Figur 1a). Deshalb schwankt ihr Abstand zur Sonne, wodurch sich das Energieangebot auf der Erdoberfläche ganz minim verändert. Entscheidender ist jedoch, dass sich die Neigung der Erdachse verändert (Figur 1b), und dass diese Erdachse eine Kreiselbewegung ausführt, die sogenannte Präzession (Figur 1c). Die Schiefe schwankt zwischen einem Neigungswinkel von 21.8 und 24.4° (momentan liegt sie bei zirka 23.5°) und unterliegt dabei einer Periodizität von zirka 41'000 Jahren. Die Präzession beschreibt eine Periode von zirka 23'000 Jahren. Die periodischen Schwankungen von Schiefe und



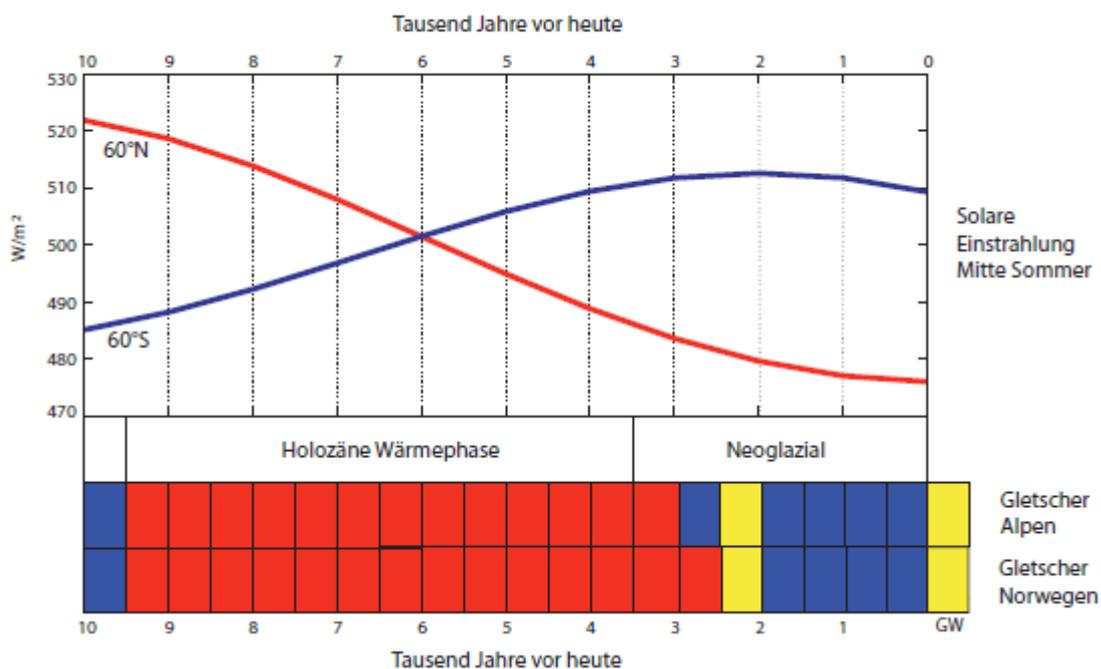
Figur 1

Darstellung der periodischen Schwankungen der drei Erdbahnparameter: a) Veränderung der elliptischen Bahn der Erde um die Sonne (Exzentrizität); b) der Neigung der Erdachse gegen die Erdbahnebene (Obliquität); c) Kreiselbewegung oder Schwingung der Erdachse (Präzession). Die roten Kurven zeigen die entsprechenden Periodizitäten (Quelle: Bildungserver wiki).

Präzession führen zu einer Umverteilung der Sonnenenergie auf der Erdkugel. Zusammen mit den Einflüssen infolge der Erdbahnschwankungen führt dies zu massiven Veränderungen der Erdenergiebilanz. Regional kann dies 30 bis 50 Watt pro m^2 ausmachen. Weil sich die grossflächigen Nordkontinente Amerika und Eurasien rascher abkühlen als die riesigen, träge reagierenden Ozeane der Südhalbkugel, treten auf den weiten, nördlich gelegenen Ebenen dieser Nordkontinente in Perioden mit schwacher Sonneneinstrahlung vermehrt Schneefälle auf. Zusammen mit dem Vordringen und der damit verbundenen Flächenzunahme des arktischen Meereises wird die Reflexion der Solarstrahlung grossflächig verstärkt. Dieser Prozess wirkt zusätzlich abkühlend (polare Selbstverstärkung genannt) und löst ein Wachstum der grossen Eisschilder über Kanada und Sibirien aus. Derartige Prozesse haben in den letzten 2.7 Millionen Jahren auf der Erde zur Entstehung von 20 oder mehr Eis- und Zwischeneiszeiten geführt. Eine Eisschmelze dieser grossen Eisschilder auf den beiden Nordkontinenten ist mit hoher Wahrscheinlichkeit immer dann eingetreten, wenn sowohl die Sommer-Einstrahlung der Sonne auf der Nordhemisphäre als auch die Konzentration des Treibhausgases Kohlendioxid angestiegen sind.

Zeitskala von Jahrtausenden (Figur 2)

Gemäss Figur 2 trat eine solche Eisschmelze ebenfalls zu Beginn der jetzt herrschenden Zwischeneiszeit ein, dem sogenannten Holozän. Dadurch wurden verschiedene, zu einer Erderwärmung führende Prozesse in Ozean und Atmosphäre ausgelöst. Der Betrag der sommerlichen Energieleistung der Sonne ging allerdings auf der Nordhemisphäre (60° Nord) im Zeitraum zwischen 10'000 Jahren vor heute und der Gegenwart sukzessive um mehr als 40 Watt pro m² zurück (rote Kurve in Figur 2). Dieser Rückgang steht im Gegensatz zum Anstieg im Südhemisphärensommer. Dieser ist wohl beachtlich, eine erneute Auslösung einer Eiszeit kann dadurch allerdings noch während Jahrtausenden nicht erfolgen. Der hohe sommerliche Einstrahlungsbetrag auf der Nordhemisphäre hat im frühen Holozän neben den grossen Eisschildern der Erde auch die Gletscher massgeblich beeinflusst. In der unten auf Figur 2 gezeigten Balkendarstellung wird sichtbar, dass die Zungenenden einer Mehrheit der Gletscher in den Alpen und in Skandinavien in dieser sogenannten Holozänen Wärmeperiode zwischen 9500 und 3000 Jahren vor heute wahrscheinlich weiter zurückgeschmolzen waren als in der Gegenwart (rote Farben). Erst ab zirka 3500 Jahren vor heute begannen die



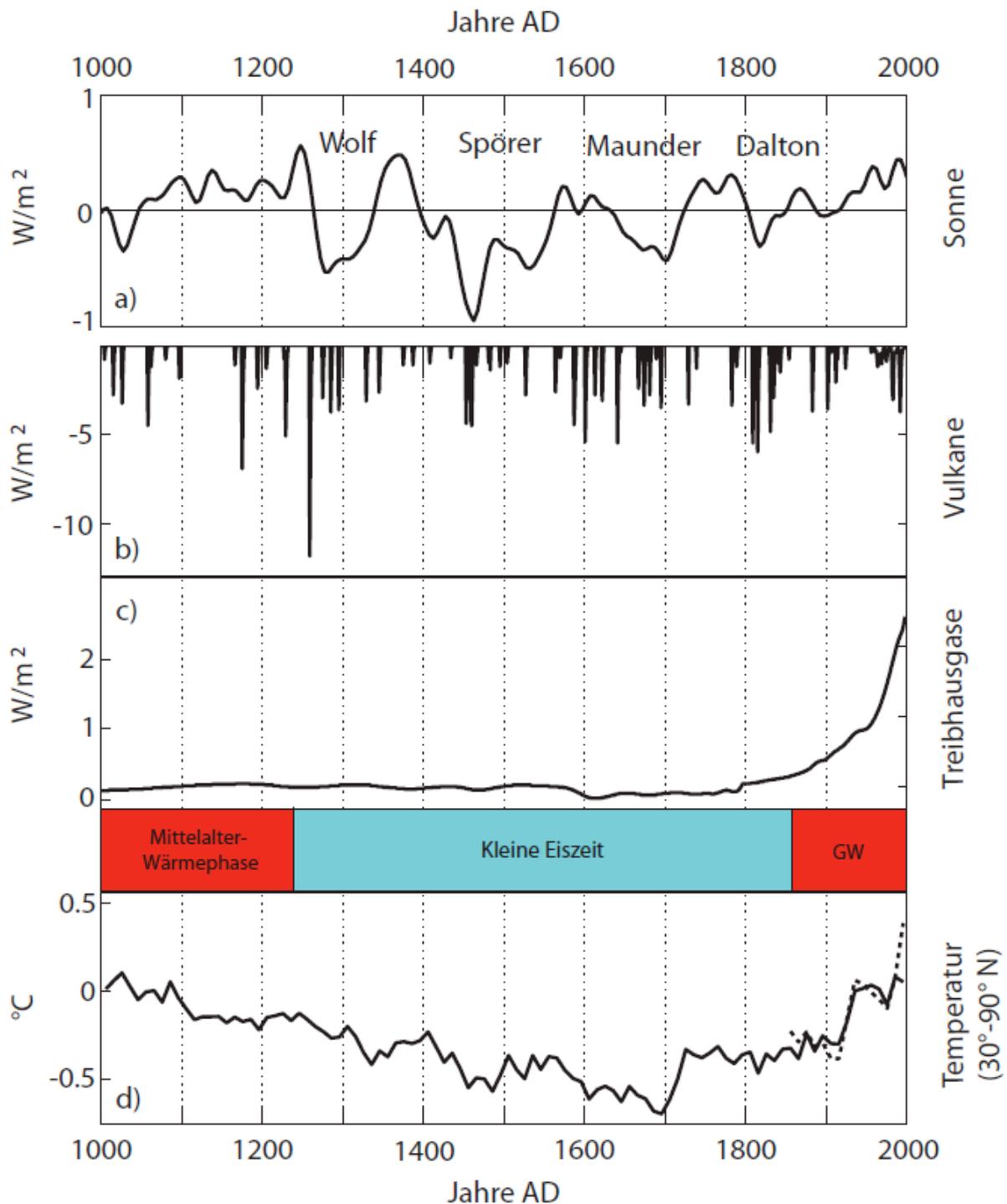
Figur 2

Oben: Berechnete Kurven der durch die Erdbahnschwankungen erzeugten Veränderungen der Energieleistung durch die Sonneneinstrahlung je für Mitte der dortigen Sommer auf der Nord- und Südhalbkugel (in Watt pro m² je für 60° Nord und Süd während der letzten 10'000 Jahre; siehe Berger, A., 1978, Journal of Atmospheric Sciences 35). Unten: Darstellung der aufgrund von Feldbefunden geschätzten Positionen der Zungenenden einer Gruppe von Gletschern in den Alpen und in Norwegen während des gleichen Zeitraumes. Rot: Rückschmelzen hinter die heutige Position / gelb: heutiger Gletscherstand / blau: Vorstoss über die heutige Position hinaus (Quelle: Diverse Publikationen zur Rekonstruktion der Gletscherstände in den Alpen und in Skandinavien, u.a. von Bakke, Hormes, Joerin, Nesje und Nicolussi).

Gletscher vor allem aufgrund der stark zurückgegangenen Sonneneinstrahlung während des nordhemisphärischen Sommers wieder markant zu wachsen und stiessen deutlich über die heutigen Stadien hinaus vor (blaue Farbe). In der Fachsprache wird diese Vorstossphase Neoglazial genannt. Umso erstaunlicher ist es, dass die meisten Gletscher nach Mitte des 19. Jahrhunderts sehr rasch massiv zurückgeschmolzen sind (heutiger Stand: gelbe Farbe; GW:Gegenwart). Dabei hat der vor allem im 20. Jahrhundert einsetzende, durch die Menschen stark beeinflusste Treibhauseffekt sehr wahrscheinlich eine entscheidende Rolle gespielt.

Zeitskala von Jahrhunderten (Figur 3)

Auf der Zeitskala von Jahrhunderten, dargestellt anhand der letzten 1000 Jahre ist der Einfluss der schwankenden Strahlungsstärke der Sonne als einer von mehreren Faktoren zu betrachten (Figur 3a). Nicht dargestellt sind hier die kurzzeitigen, zirka 11jährigen Perioden, welche sich auch in der Zahl der Sonnenflecken manifestieren (siehe Figur 4a). Zudem sind hier bewusst die Schwankungen der totalen solaren Einstrahlung an der Obergrenze der Erdatmosphäre dargestellt, welche sich in der Grössenordnung von zirka 1365-1367 Watt pro m^2 bewegen. Nur rund 17.5% dieses Energieangebots werden aus geometrischen Gründen (siehe: <http://www.klimedia.ch/kap2/a17.html>, oder auch: http://www.naturama.ch/data/animation_start2.cfm) und wegen der Reflexion dieser kurzwelligigen Strahlen von der Erdoberfläche absorbiert (aufgenommen). Auf diese Tatsache wird im nächsten Abschnitt anhand von Figur 4a noch detaillierter eingegangen. Die solaren Aktivitätsschwankungen können nicht losgelöst von den anderen Schwankungsfaktoren betrachtet werden. Im Vordergrund stehen explosive Vulkaneruptionen (Säulen in Figur 3b) sowie der Treibhauseffekt, verursacht durch die wichtigsten vom Menschen beeinflussten Treibhausgase Kohlendioxid, Methan und Lachgas (Kurve in Figur 3c). Diese drei Schwankungsfaktoren werden hier mit einem präzise rekonstruierten bzw. gemessenen nordhemisphärischen Temperaturverlauf verglichen (Figur 3d). Deutlich ist zu erkennen, dass die Kältephase der Kleinen Eiszeit mit mehreren Kälte minima wahrscheinlich durch mehrere Gruppen von explosiven Vulkaneruptionen sowie durch vier ausgesprochene Strahlungsminima der Sonne (in Figur 3a mit deren Name bezeichnet) entscheidend mitverursacht wurde. Moderne Modellrechnungen bestätigen diese Tatsache, zeigen aber deutlich, dass das oben auf Figur 2 gezeigte, erdbahnbedingte sommerliche Einstrahlungsminimum des Neoglazials für die Abkühlung der Kleinen Eiszeit sozusagen die kühlende Kulisse gebildet hat. Zudem haben auch interne, durch Rückkopplungen ausgelöste Prozesse (z.B. im Ozean) eine wesentliche Rolle gespielt. Spannend ist gemäss Figur 3, dass zu Beginn der Abkühlung der Kleinen Eiszeit mehrere gewaltige Vulkaneruptionen auftraten (u.a. im Jahr 1258), welche wahrscheinlich entscheidend



Figur 3

3a) Rekonstruierte Kurven der Energieleistung durch die schwankende Sonnenstrahlung (Abweichung vom langjährigen Mittel; Quelle: Steinhilber et al., 2009, Geophysical Research Letters 36).

3b) Rekonstruierte Schätzungen des Einbruches der Energieleistung infolge grosser Vulkaneruptionen (Quellen: Crowley et al., 2008, PAGES News 16; Gao et al., 2008, Journal of Geophysical Research 113).

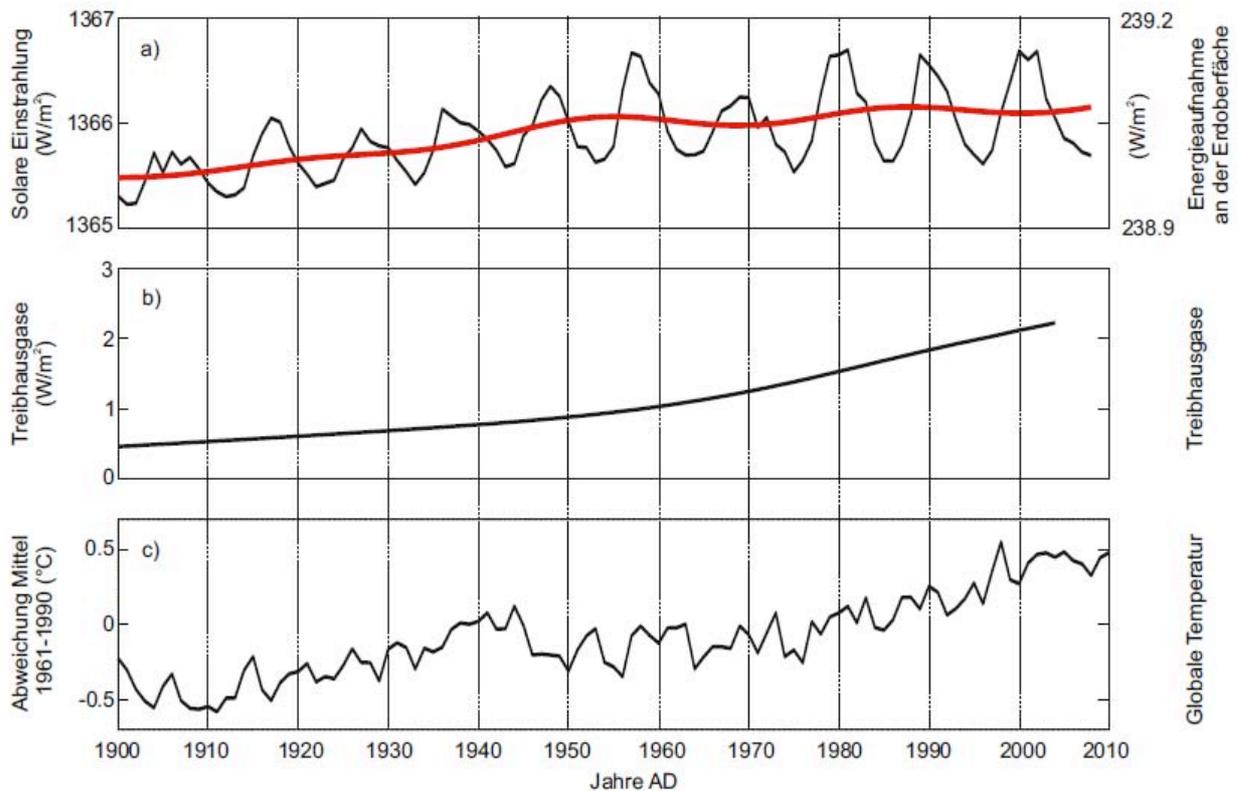
3c) Erhöhung der Energieleistung durch den Treibhauseffekt, dargestellt als positive Abweichung vom Minimalwert der letzten 1000 Jahre (Quelle: IPCC 2007; Wanner et al., 2011, Quaternary Science Reviews, 30).

3d) Rekonstruierter (durchgezogene Linie) und gemessener (gestrichelte Linie) Verlauf der mittleren bodennahen Temperatur auf der Nordhemisphäre zwischen 30 und 90° N, dargestellt als Abweichung vom Mittel der Jahre 1961-1990 (Quelle: Ljungqvist, 2010, Geografiska Annaler 92A).

zum Beginn des Temperaturrückgangs beitragen und phasenweise auch zu stärkeren Sommerniederschlägen führten. In der zweiten Hälfte des 15. Jahrhunderts sowie im 16. und 19. Jahrhundert wurden drei Minima der solaren Leuchtstärke von Gruppen mit starken Vulkaneruptionen überlagert und trugen damit gemeinsam zu einer markanten Abkühlung bei. Wie Figur 3a andeutet, verhält sich die Leuchtstärke der Sonne mehr oder weniger periodisch (längere Perioden umfassen zirka 90, 210 und 510 Jahre). Dabei wird ebenfalls sichtbar, dass die Schwankungsbreite zwischen den solaren Einstrahlungsmaxima und -minima sehr wahrscheinlich beitragsmässig gering war. Hier müssen weitere Studien zu einer höheren Präzision führen. Die sich auf die Energiebilanz der Erde negativ auswirkenden Abweichungen der Vulkaneruptionen weisen höhere Beträge auf. Diese Ereignisse sind jedoch mit 2-3 Jahren von äusserst kurzer Dauer und nur dann von längerfristiger Wirkung, wenn sie in Gruppen auftreten. Betrachten wir in Figur 3d die markante Erwärmung der Gegenwart (GW), so stellen wir fest, dass der Beitrag des Treibhauseffektes, welcher stark menschengepägt ist, heute bereits deutlich über 2 Watt pro m^2 liegt. Abgesehen von kürzeren Störungen im Klimasystem verlief er in den letzten 150 Jahren annähernd parallel zum gemittelten Temperaturverlauf.

Zeitskala von Jahrzehnten (Figur 4)

Bei einer Betrachtung der Zeitskala der letzten Jahrzehnte wird der globale Temperaturverlauf (Figur 4c) mit den Energieleistungen verglichen, welche durch die Sonneneinstrahlung an der Atmosphärenobergrenze (Figur 4a) sowie durch die zunehmende Konzentration der drei wichtigsten, stark durch die menschlichen Aktivitäten beeinflussten Treibhausgase Kohlendioxid, Methan und Lachgas erzeugt werden (Figur 4b). In Figur 4a wird neben den Schwankungen des zirka 11jährigen Schwabezyklus, welcher sich auch in den Sonnenflecken abbildet (schwarze Kurve), auch der langfristige Trend dargestellt (rote Kurve). Der Umfang (genannt Amplitude) der Schwankungen der Energieleistung der Sonne beträgt gemäss der linken Skala in Figur 4a zirka 1.5 Watt pro m^2 . Der mittlere Trend anhand der roten Kurve beträgt nach der linken Skala nur zirka 0.75 Watt pro m^2 . Dieser Wert reduziert sich jedoch zusätzlich, weil wir nur die anhand von Figur 3 erwähnten, rund 17.5% jener Energieleistung betrachten müssen, welche von der Erdoberfläche auch tatsächlich absorbiert (aufgenommen) werden. Der Trend dieser roten Kurve liegt gemäss der rechts auf Figur 4a dargestellten Skala mit zirka 0.13 Watt pro m^2 etwa um einen Faktor 14 tiefer als der in Figur 4b dargestellte Energieantrieb durch die wichtigsten, zum überwiegenden Teil menschengemachten Treibhausgase. Zudem nimmt der durch diese Treibhausgase erzeugte Energieantrieb dauernd zu. Auch Modellrechnungen und statistische Abschätzungen ergeben, dass die Sonne trotz möglicher Verstärkungseffekte (Rückkopplungen) im Klimasystem höchstens mit einem Viertel oder



Figur 4

a) Schwarze Kurve: Energieleistung der Sonne an der Atmosphärenobergrenze. Neben einem schwachen Trend, der zusätzlich in Form der roten Kurve dargestellt ist, wird der 11-jährige Schwabezyklus sichtbar, welcher sich auch in den Sonnenflecken abbildet (Daten aus: Schmidt et al., 2011: Geosci. Model Dev. 4, 33-45; Autoren: Lean, Sheeley, Wang).

b) Kurve des Energieantriebes durch die zunehmende Konzentration der Treibhausgase Kohlendioxid, Methan und Lachgas (Originaldaten zur Verfügung gestellt von Fortunat Joos, Klima- und Umweltphysik der Universität Bern).

c) Geglättetes Mittel der Abweichung der globalen Mitteltemperatur vom 30-jährigen Mittel 1961-1990 (Datensatz: HadCRUT3, heruntergeladen vom KNMI Climate Explorer).

Fünftel oder zirka 0.20-0.25 °C zur globalen Erwärmung der letzten 120 Jahre beigetragen hat, welche aufgrund der gemittelten Landtemperaturen bereits rund 1° C beträgt. Aufgrund des heutigen Verständnisses der Sonnenphysik muss zudem angenommen werden, dass die mittlere solare Einstrahlung in den nächsten Jahrzehnten leicht abnehmen wird. Dieser Effekt dürfte zwar den in den letzten 30 Jahren beobachteten globalen Temperaturanstieg (Figur 4c) leicht dämpfen. Trotzdem muss mit hoher Wahrscheinlichkeit angenommen werden, dass die globalen Temperaturen, bedingt durch den vor allem menschengemachten Treibhauseffekt, weiterhin deutlich ansteigen werden. Dadurch werden ebenfalls signifikante Veränderungen der ozeanischen und atmosphärischen Zirkulation und des Wasserkreislaufes auftreten. Beunruhigend ist dabei in erster Linie die Tatsache, dass die Niederschläge in den bevölkerungsreichen Subtropen weiter zurückgehen werden.

Weitere Einflussfaktoren sowie Unsicherheiten

Auf der kurzen Zeitskala von mehreren Jahren bis Jahrzehnten oder im Extremfall Jahrhunderten sind die sich sowohl negativ als auch positiv auf die Wärmebilanz der Erde auswirkenden Schwankungen infolge der natürlichen Variabilität des Klimasystems von zentraler Bedeutung. Im asiatisch-pazifischen Raum betrifft dies vor allem den wärmenden El Niño, welcher alle paar Jahre auftritt und die globale Mitteltemperatur während zirka 1-2 Jahren um mehrere Zehntelgrade ansteigen lässt. Im Jahre 2011 hat dessen kühle Schwester La Niña jedoch zu einer Dämpfung der globalen Erwärmung beigetragen. Im europäischen Raum ist es die Nordatlantische Oszillation (NAO), welche in Perioden von 10-15 Jahren zu milderem oder härteren Wintern führt und möglicherweise bei solaren Strahlungsminima die Bildung länger andauernder Kaltphasen unterstützen kann. Allerdings ist fraglich, ob die NAO beim Übergang von der Wärmephase des Mittelalters zur Kleinen Eiszeit den Anstoss gegeben hat wie dies in gewissen Publikationen postuliert wird. Die kalte, negative Phase der NAO ist eher eine Folge geringer Sonneneinstrahlung oder interner Vorgänge zwischen Ozean, Meereis sowie bodennaher und höherer Atmosphäre. Dieses Beispiel unterstreicht, dass die natürlichen Klimaschwankungen auf der zehnjährigen bis hundertjährigen Zeitskala nach wie vor nur beschränkt verstanden werden. Für eine Gesamtsicht dieser Einflussfaktoren sind jedoch immer die quantitativen Angaben und Beiträge wichtig. Eine Argumentation einzig über Korrelationen, oft benutzt in diesen Diskussionen, ist unvollständig und irreführend.

Die Kritik gegenüber zukünftigen Klimaszenarien geht einerseits davon aus, dass der Einfluss durch die Wolken und vor allem deren Beeinflussung durch die kosmische Strahlung ebenfalls nur teilweise verstanden werden. Eine quantitativ präzise Wirkung der kosmischen Strahlung ist allerdings bisher nicht nachgewiesen. Zukünftige Forschungen (u.a. im Rahmen des CLOUD-Projektes am CERN in Genf) werden hier mehr Klärung bringen. Andererseits befasst sich die Forschung vermehrt mit der Veränderung der Erdenergiebilanz aufgrund von Landnutzungsänderungen (u.a. Versiegelung von Oberflächen durch Überbauungen, Abholzen der Regenwälder und Ausdehnung der Wüstengebiete). Auch diese Effekte sind deutlich menschbeeinflusst. Sie werden folglich in Zukunft quantitativ noch bedeutender werden und eher zu einer Zunahme des bodennahen Energieangebotes in der Grössenordnung von höchstens wenigen Zehnteln Watt pro m^2 führen. Dies gilt auch für die Wirkung der atmosphärischen Aerosole, deren Konzentration abgesehen von grossen Vulkanereignissen stark durch menschliche Aktivitäten beeinflusst wird. Aerosole führen in der höheren Atmosphäre zu einer Erwärmung, am Erdboden jedoch zu einer Abkühlung, gegenwärtig in der Grössenordnung von wenigen Zehntelgraden. Neuere Arbeiten weisen zudem darauf hin, dass auch die Veränderungen der Oberflächentemperaturen des Atlantiks durch die atmosphärische Aerosolkonzentration beeinflusst werden können. Schliesslich soll

nicht unerwähnt bleiben, dass Stärke und Wirkung der schwankenden Solarstrahlung je nach Wellenlänge und Aktivität der Sonne unterschiedlich ausfallen können. Insbesondere die Ultraviolettstrahlung zeigt markante Schwankungen. Dieser Aspekt muss in Zukunft stärker untersucht werden, auch wegen des wichtigen Einflusses dieser energiereichen Strahlung auf die stratosphärische Ozonschicht. Deren Ausdünnung kann neben ungünstigen biologischen Auswirkungen auch zu einem Temperaturanstieg an der Erdoberfläche führen.

Zur zukünftigen Entwicklung des Klimas

Wenn wir die Veränderungen der natürlichen Klima-Antriebsfaktoren Sonne und Vulkane in den Figuren 3 und 4 abschliessend mit dem hochgradig menschgemachten Einfluss der drei wichtigsten Treibhausgase vergleichen, so stellen wir fest, dass dem Einfluss der Treibhausgase bereits jetzt, und in Zukunft zunehmend, eine dominante Rolle zukommt. Richtig ist, dass deren exakte Wirkung auf die Komponenten des komplexen Klimasystems (Atmosphäre, Ozeane, Eis, Kontinente inklusive Vegetation), insbesondere auf regionaler Skala, nach wie vor nicht einfach abzuschätzen ist. Die aufgrund von Tests in vergangenen Klimaperioden langjährig und weltweit erprobten globalen Simulationsmodelle zeigen jedoch klar, dass wir sehr wahrscheinlich annehmen dürfen, dass die Muster des gegenwärtigen Klimawandels wie der globale bodennahe Temperaturanstieg und die Veränderungen des Wasserkreislaufes zu einem hohen Anteil durch die menschgemachten Treibhausgase mitverursacht werden. Die oben erwähnte temporäre Dämpfung des Temperaturanstiegs durch einen leichten Rückgang der Solaraktivität dürfte eine untergeordnete und nur vorübergehend wirksame Rolle spielen. Folglich wird den Menschen und ihrem Handeln im laufenden Jahrhundert im Bezug auf die Entwicklung des Klimas eine absolut zentrale Rolle zukommen.

Zusätzliche Literatur

Aus wissenschaftlicher Sicht kann die folgende Publikation empfohlen werden:

Lockwood, M., 2012: Solar influence on global and regional climates. *Surveys in Geophysics*. DOI 10.1007/s10712-012-9181-3

Der Autor bedankt sich bei Thomas Stocker für kritische Kommentare und Korrekturen, bei Petra Breitenmoser für die kritische Lesung des Manuskripts und für graphische Hilfen, sowie bei Fortunat Joos und Marco Steinacher für die Daten der Treibhausgase.

¹ *Heinz Wanner ist emeritierter Professor der Universität Bern und arbeitet am dortigen Oeschger-Zentrum für Klimaforschung. Er hat über 200 Artikel und Bücher publiziert, rund die Hälfte davon in rezensierten internationalen Zeitschriften.*