

Klimawandel und CO₂ aus geowissenschaftlicher Sicht

Dr. U. Berner, Hannover, **Prof. Dr. A. Hollerbach**, Hannover

Kurzfassung

Klima zeichnet sich immer durch Wandel aus und die heutige Klimaänderung ist verglichen mit denen der Vergangenheit in ihrem Ausmaß noch sehr moderat und nicht ungewöhnlich. Kohlendioxid war und ist ein wichtiges Treibhausgas, aber es war nicht allentscheidend für die Klimawandel der Vergangenheit. Die bisherigen Untersuchungen liefern Argumente dafür, dass die Sonne einen deutlichen lenkenden Einfluss auf das Klima ausgeübt hat. Auch wenn die menschliche Gesellschaft durch Emissionsminderung nicht korrigierend auf klimatische Veränderungen einwirken kann – dies zeigen Modellrechnungen sehr deutlich – so ist Ressourcenschutz, vernünftiges Verhalten und nachhaltiges Wirtschaften keineswegs überflüssig, da unsere fossilen Energieträger endlich sind.

1. Einleitung

Die Entwicklung der Industriegesellschaft seit Mitte des 19. Jahrhunderts hat zu einer verstärkten Nutzung fossiler Energieträger wie Kohle, Erdöl und Erdgas geführt, um den wachsenden Energiebedarf zu decken. Damit haben auch die Emissionen klimawirksamer Gase zugenommen, wodurch die Konzentration der so genannten Treibhausgase in der Erdatmosphäre gestiegen ist. Gängige Meinung ist: Durch die menschlichen Treibhausgasemissionen und den Konzentrationsanstieg der Treibhausgase in der Atmosphäre ist die mittlere globale Temperatur im Verlauf der letzten 150 Jahre angestiegen [1].

Verfolgt man die Diskussion um den derzeitigen Klimawandel, so gewinnt man den Eindruck Außergewöhnliches und Extremes würde geschehen, man bekommt zudem über Beratungsgremien und Medien vermittelt, dass sich das Klima in der Vergangenheit nicht oder nur wenig geändert hat. Es wird auch der Eindruck erweckt, man könne das Klima durch Emissionsminderungsmaßnahmen schützen [1]. Die für einen angestrebten Schutz des Klimas notwendigen ökologisch motivierten politischen Maßnahmen erfordern ein Grundwissen über klimatische Prozesse und müssen sich an dem jeweiligen aktuellen naturwissenschaftlichen Kenntnisstand orientieren. Politiker, wie auch die Gesellschaft,

müssen sich darüber im Klaren sein, dass Maßnahmen zur Minderung von Treibhausgasemissionen die soziale und ökonomische Entwicklung der menschlichen Gesellschaft in hohem Maße beeinflussen. Vor diesem Hintergrund ist die Frage, ob Klimaschutz eine lösbare Herausforderung darstellt oder ob Politik und Gesellschaft ihre Möglichkeiten überschätzen, sicherlich berechtigt und notwendig. Denn nur durch erneute Positionsbestimmungen vor einem sich wandelnden Kenntnisstand in der Klimaforschung können Politiker die richtigen Entscheidungen für die Zukunft treffen oder frühere modifizieren.

2. Ist der derzeitige Klimawandel ungewöhnlich?

Aufzeichnungen meteorologischer Messungen, aus denen sich Klimaänderungen ableiten lassen, erfolgen seit etwa 150 Jahren. Dies ist ebenfalls der Zeitraum, in dem sich die industrielle Entwicklung mit dem durch sie verursachten Anstieg der Treibhausgasemissionen vollzieht. Es ist ebenfalls der Zeitraum in dem sich die Landnutzung gravierend veränderte, auch sie hat möglicherweise einen nicht zu vernachlässigenden Einfluss auf das Klimasystem der Erde. Dies bedeutet, dass die Klimabeobachtungen der letzten 150 Jahre auf einer Melange aus natürlichen Klimaprozessen und zusätzlich durch den Menschen in das Klimasystem eingebrachten Veränderungen beruhen. Bedingt durch die Überlagerung fällt heute schwer zwischen natürlicher Klimaentwicklung und einer durch den Menschen beeinflussten Klimaschwankung zu unterscheiden. Will man das Klimasystem wirklich verstehen, so hilft nur der Blick zurück in Zeitabschnitte der Vergangenheit, in denen der Mensch nicht oder nur sehr wenig das Klimageschehen beeinflusste. Mit dem Verständnis dieser Prozesse in der Vergangenheit können wir dann einen möglichen Einfluss des Menschen untersuchen.

Dies ist die Motivation, warum sich Geowissenschaftler und hier speziell die so genannten Paläoklimatologen der Entschlüsselung des Klimas vergangener Zeitabschnitte widmen. Sie gewinnen ihre Erkenntnisse indem sie die hinterlassenen Gesteine und das Eis großer Gletscher untersuchen [2]. Ablagerungen aus dem Meer, aus Seen und das Eis von Gebirgsgletschern, der Antarktis und Grönlands dienen als Grundlage für Klimarekonstruktionen.

Diese Untersuchungen der Vergangenheit zeigen, dass viele klimatische Wechsel mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten erfolgten. Dieses klimatische Auf und Ab früherer Zeiten glich einer Achterbahnfahrt. So wandelten sich die großen Eiszeitalter im Abstand von

vielen Millionen Jahren zu regelrechten Heißzeiten [2]. Innerhalb der Eiszeitalter pendelte das Klima zwischen Kalt- und Warmzeiten; es mag vielen gar nicht bewusst sein, aber wir leben heute in der Warmzeit eines Eiszeitalters. Selbst die Kaltzeiten sind in sich auch durch ein Auf und Ab der Temperaturen geprägt [3,4,5]. Bestes Beispiel dafür ist die letzte Kaltzeit, die so genannte Weichsel-Kaltzeit, mit ihren Sprüngen zwischen Erwärmung und Abkühlung.

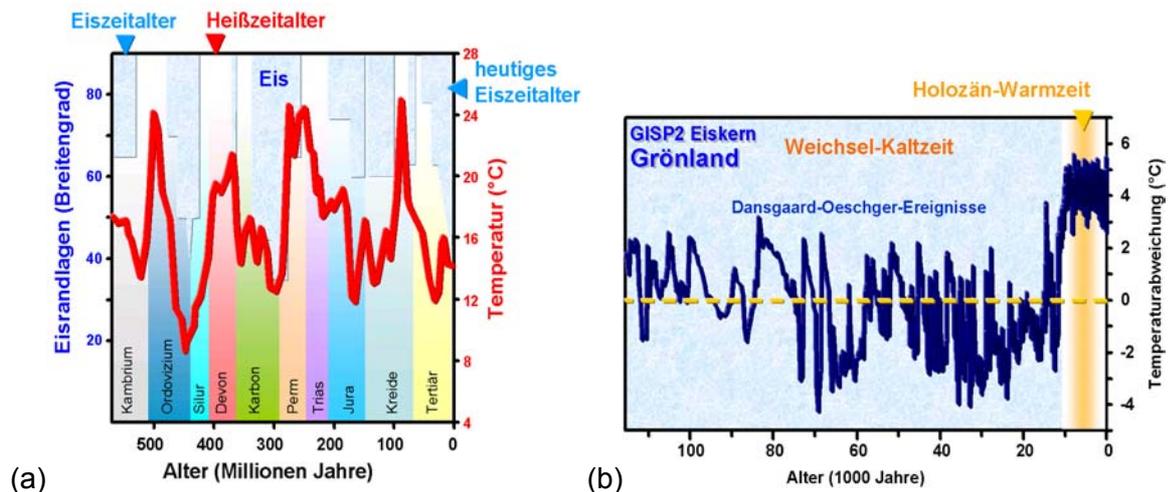


Bild 1: (a) Rekonstruierte Temperaturvariationen und Eiszeitalter im Verlauf der letzten 570 Millionen Jahre [2]; (b) Die Weichsel-Kaltzeit ist stärker als die Holozän-Warmzeit durch Temperatursprünge gezeichnet [3,4,5].

Die Warmzeiten innerhalb der Eiszeitalter waren ebenfalls nicht frei von Abkühlungen und Erwärmungen, auch nicht die Warmzeit in der wir heute leben – das Holozän. Die Klimaschwünge im Holozän waren nicht so dramatisch wie in der vorausgehenden Kaltzeit, der Weichsel-Kaltzeit, dennoch waren sie markant genug, um in historischen Zeiten die soziale und ökonomische Entwicklung der menschlichen Kulturen zu beeinflussen.

Klima zeichnet sich immer durch Wandel aus und unsere heutige Klimaänderung ist, verglichen mit denen der Vergangenheit, in ihrem Ausmaß noch sehr moderat und nicht ungewöhnlich!

3. Steuern Treibhausgase das Klima der Erde?

Der Zuwachs an menschlichen Treibhausgasemissionen und der beobachtete Temperaturanstieg im Verlauf der letzten 150 Jahre [6,7,8] hat zu dem Schluss geführt, dass ein direkter ursächlicher Zusammenhang zwischen Treibhausgaskonzentration und Temperaturentwicklung besteht. Als wichtigstes vom Menschen emittiertes Treibhausgas gilt

das Kohlendioxid. Es gilt daher zu untersuchen, ob Klimawandel in der Vergangenheit auch Konzentrationsänderungen des Kohlendioxids zuzuschreiben sind.

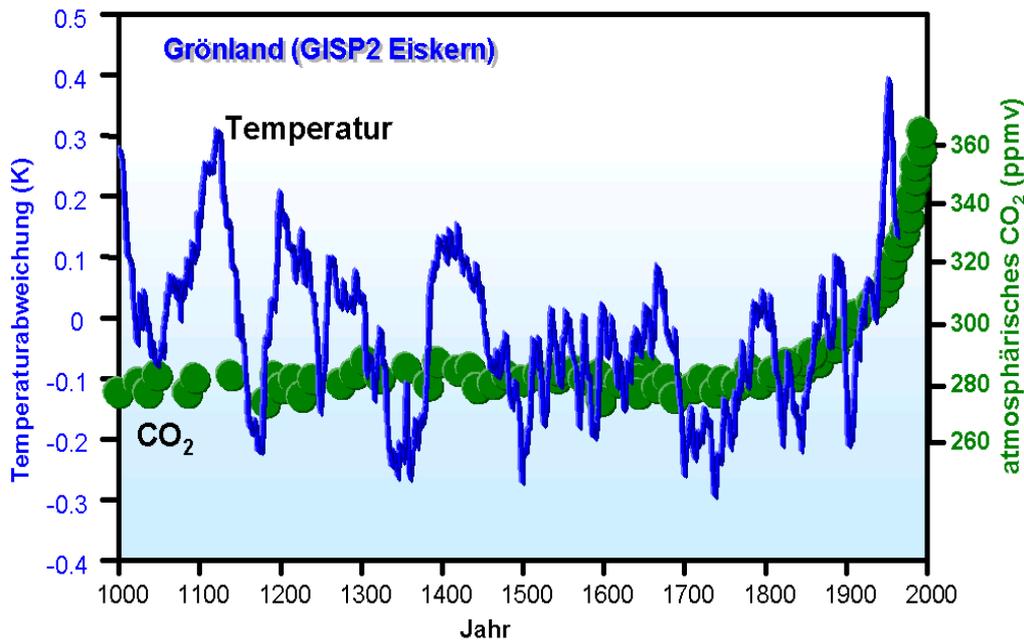


Bild 2: Ein Beispiel für die grönländische Klimadynamik der letzten 1000 Jahre [10]. Die gleich bleibenden atmosphärischen CO₂-Konzentrationen [8] zwischen 1000 und 1800 können die rekonstruierten Klimavariationen nicht erklären.

Rekonstruktionen des Klimas vergangener Zeiten belegen allerdings, dass die Temperaturentwicklung und die Änderung der atmosphärische Kohlendioxidgehalte nicht immer gleichsinnig verlaufen sind. Gerade die letzten 1000 Jahre machen deutlich, dass Klimawandel auch ohne Änderung der atmosphärischen Kohlendioxidkonzentration stattfindet. Eiskerne zeigen uns, dass konstante CO₂-Konzentration von 1000 bis zum Beginn des 18. Jahrhunderts existierten, gefolgt von einem rapiden CO₂-Anstieg, der durch die menschlichen Emissionen verursacht wurde. Eiskerne belegen aber auch, welche Dynamik in der Temperatur- und Klimaentwicklung der letzten 1000 Jahre stecken. Und nicht nur Eiskerne verdeutlichen diese Klimadynamik, sondern eine Vielzahl von weiteren Rekonstruktionen weltweit [9, 10,11,12,13,14]. Erkennbar ist aus diesen Rekonstruktionen, dass es eine Warmphase zur Zeit des Hochmittelalters gegeben haben muss, an die sich eine Phase der Abkühlung ab Mitte des 14. Jahrhunderts angeschlossen hat, auf die dann ein erneuter Temperaturanstieg ab Mitte des 19. Jahrhunderts folgte. Heute werden diese Abschnitte der 1000-jährigen Klimaentwicklung als mittelalterliches Klimaoptimum, als Kleine Eiszeit und neuzeitlicher Klimawandel bezeichnet. Betrachtet man zunächst nur die Jahre 1000 bis 1800 so erkennt man, dass Kohlendioxid für die Dynamik der rekonstruierten

Klimaentwicklung nicht verantwortlich sein kann, da seine Konzentration konstant gewesen ist. Man muss, daher davon ausgehen, dass weitere Faktoren das Klimasystem in diesem Zeitabschnitt von 800 Jahren wirksam beeinflussten.

Der wichtigste Antrieb des Klimasystems, der eigentliche Motor des Klimas, ist die Sonne, die die Erde mit Energie versorgt. Diese Energieversorgung geschieht allerdings nicht gleichförmig, sondern ist Schwankungen unterworfen. Diese Strahlungsschwankungen der Sonne kann man auch in der Vergangenheit indirekt durch die Konzentrationsbestimmung bestimmter Atome (C^{14} und Be^{10}) in den Ablagerungen der Erde nachweisen [2]. Daraus lässt sich ableiten, dass die Sonne zur Zeit des Hochmittelalters und des damaligen klimatischen Optimums recht aktiv gewesen ist. Zur Zeit der Kleinen Eiszeit muss man davon ausgehen, dass die Sonne weniger aktiv war und regelrechte Ruhephasen eingelegt hat. Während des neuzeitlichen Klimawandels mit seinem Temperaturanstieg hat die Sonnenaktivität ab Mitte des 19. Jahrhunderts deutlich zugenommen und war am Ende des 20. Jahrhunderts am stärksten [15].

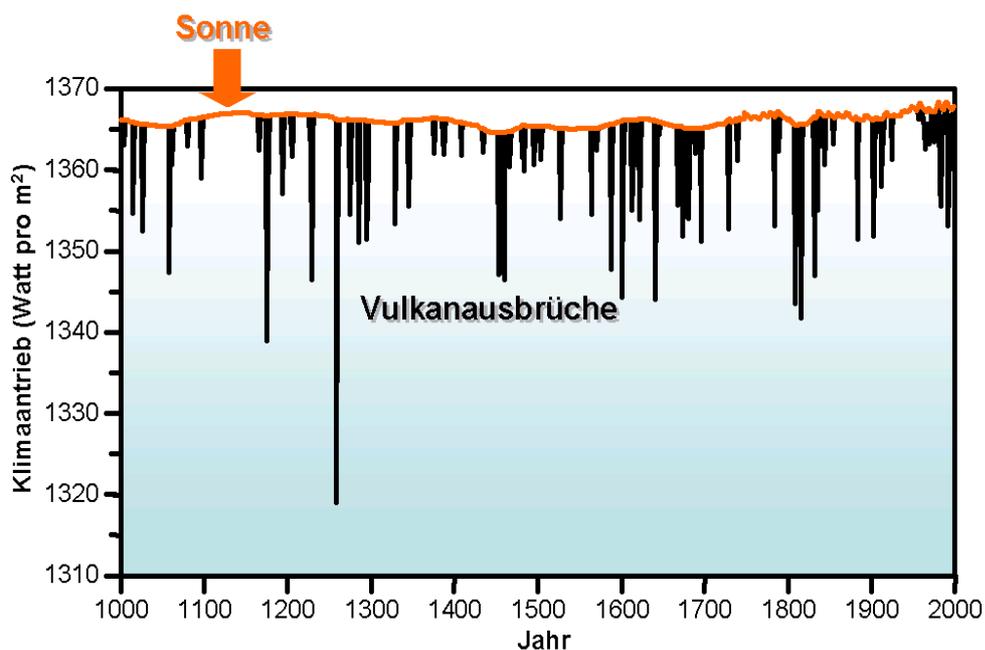


Bild 3: Rekonstruierte Variationen der Solarstrahlung und des Einflusses von großen Vulkanausbrüchen im Verlauf der letzten 1000 Jahre [15, 16,17].

Die durch die Sonne gesteuerte Energiebilanz wird durch große Vulkanausbrüche empfindlich gestört [16]. Gewaltige Eruptionen, die Gase und Aschen mehrere Kilometer hoch in die Atmosphäre schleudern sind besonders klimawirksam. Aber diese

Klimawirksamkeit beschränkt sich auf wenige Jahre. Die großen, klimawirksamen Vulkanausbrüche hinterlassen ihre Spuren auch im Eis von Grönland. Hieraus ergibt sich die Möglichkeit dem klimatischen Einfluss von Vulkanausbrüchen auch in der Vergangenheit nachzuspüren. Nach Vorstellung von Wissenschaftlern können Variationen der Sonnenstrahlung und der kühlende Effekt der Vulkanaschen die Klimaänderungen der letzten 1000 Jahre bewirkt haben. Um diese Hypothese der externen Klimasteuerung zu überprüfen, verwendete man Klimamodelle, in denen das virtuelle Klimasystem durch die Änderung der Solarstrahlung und Auftreten von großen Vulkanausbrüchen angetrieben wird. Ergebnisse dieser Rechnungen [17] mit dem ECHO-G Modell machen deutlich, dass die Sonne in hohem Maße das Klima der letzten 1000 Jahre beeinflusst hat und Vulkanausbrüche zu kurzen Perioden kühlerer Temperaturen beigetragen haben. Diese Modellierung mit einem gekoppelten Ozean-Atmosphären-Modell passt sehr gut zu der Vielzahl von Einzelrekonstruktionen [9] und zeigt sehr deutlich das Mittelalterliche Klimaoptimum, die Kleine Eiszeit und den neuzeitlichen Klimawandel. Die berechnete Temperaturdynamik umfasst etwas mehr als 1 Kelvin für die letzten 1000 Jahre.

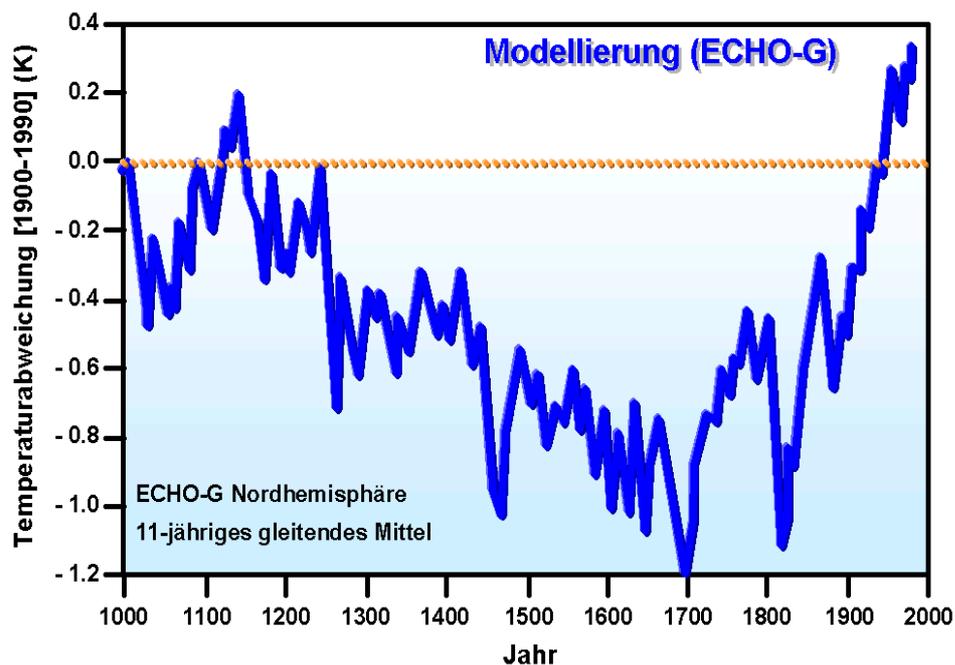


Bild 4: Modellierte Temperaturänderungen im Verlauf der letzten 1000 Jahre [17].

Ein Vergleich der Temperaturentwicklung über die letzten 150 Jahre mit der Zunahme des Kohlendioxids weist auf keinen direkten kausalen Zusammenhang hin. Der Einfluss der Sonne auf das Klima der letzten 150 ist Gegenstand eines heftigen Disputes unter Wissenschaftlern. Seit 1999 gilt allgemein das Diktum: „Der Einfluss der Sonne ist ein

wichtiger Faktor im globalen Klimawandel, jedoch ist der rasche Temperaturanstieg der letzten 20 Jahre durch andere Faktoren bestimmt.“[18] Weitergehende wissenschaftliche Befunde lassen aber eine neue Bewertung zu, denn die mit dem Modell ECHO-G erzielten Ergebnisse für die Jahre 1948 bis 1990 machen den starken Einfluss der Sonnenvariationen auf die Modellergebnisse deutlich, und es könnte für das reale Klimasystem gelten: „....der solare Antrieb trägt zu einem erheblichen Maße zu den nordhemisphärischen [Temperatur-] Variationen dieses Zeitraums [1948 – 1990] bei.“ [17].

Die bisherigen Untersuchungen liefern also viele Argumente dafür, dass die atmosphärischen Treibhausgase in den vergangenen 1000 Jahren nicht die Auslöser und Hauptfaktoren von dokumentierten und rekonstruierten Klimaänderungen gewesen sein können, sondern dass die Sonne einen deutlichen lenkenden Einfluss auf das Klima ausgeübt hat. Kohlendioxid war und ist ein wichtiges Treibhausgas, aber es war nicht allentscheidend für die Klimawandel der Vergangenheit.

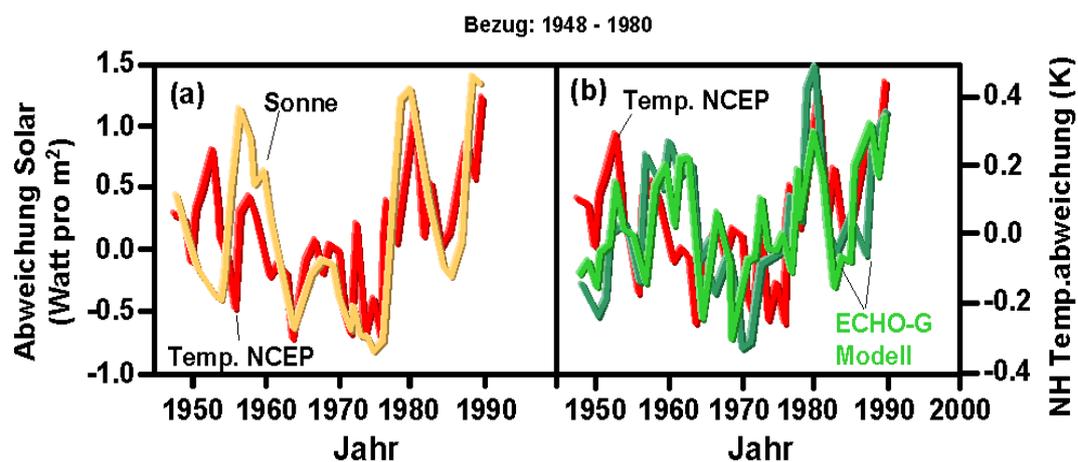


Bild 5: (a) Beobachtete Temperaturvariationen und Insolation ähneln sich in hohem Maße, (b) modellierte Temperaturänderungen geben die beobachteten Temperaturänderungen zwischen 1948 und 1990 recht gut wider [17].

4. Wie sieht die Klimazukunft aus?

Die Frage, ob wir mit Reduktionsmaßnahmen bei der Emission von Kohlendioxid unser Klima schützen können, steht im Fokus der öffentlichen Diskussion. Bei der Bewertung von Reduktionsmaßnahmen sind wir wieder auf Computermodelle angewiesen, denn sie stellen die einzige Möglichkeit dar, einen vorsichtigen Blick auf Zukunftsszenarien zu werfen. Modellrechnungen zu der Wirksamkeit von Minderungsmaßen ergeben, dass das Kohlendioxid der Atmosphäre auch in absehbarer Zukunft weiter steigt, weil die Prozesse im Kohlenstoffkreislauf nicht angehalten werden können [19].

Szenarienrechnungen mit Bezug zum so genannten Kyoto-Protokolls zeigen, dass selbst durch kostenintensive Emissionsminderungen keine nennenswerten klimatischen Änderungen herbeigeführt werden können [20]. Selbst wenn die Industriestaaten über die Maßnahmen des Kyoto-Protokolls hinaus bis 2100 pro Jahr ihre Kohlendioxidemissionen um 1% reduzieren würden, ließe sich nur eine minimale globale Temperaturminderung erzielen.

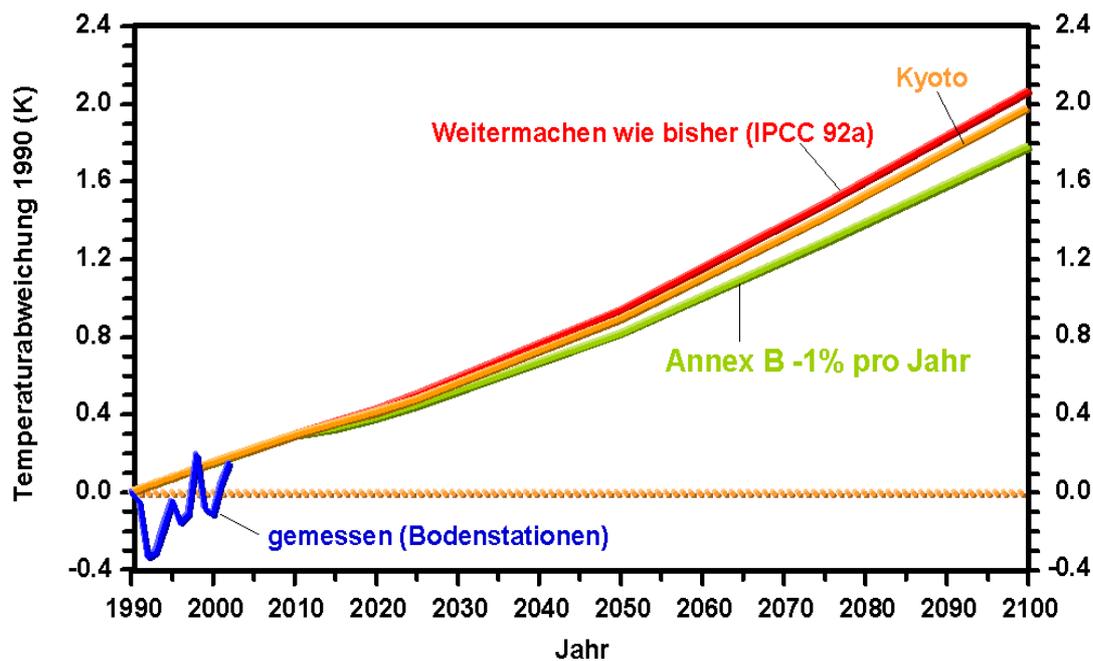


Bild 6: Mögliche Entwicklungen der Temperatur gegenüber 1990. Die Ergebnisse von drei Szenarienrechnungen „weitermachen wie bisher“, „Umsetzen des Kyoto-Protokolls“ und „Industriestaaten (Annex B) mindern bis 2100 ihre CO₂-Emissionen um jährlich 1%“ zeigen sehr ähnliche Ergebnisse [20]. Die bisher gemessenen Temperaturen (blau) [6] liegen weitestgehend unterhalb der Szenarietemperaturen.

All diese Szenarien haben die Veränderlichkeit der Sonne und ihre Wechselwirkungen mit dem Klima nicht berücksichtigt. Leider wissen wir nur wenig über die Entwicklung der zukünftigen Aktivitätsänderungen der Sonne (Sonnenfleckenzyklus). Lediglich den Verlauf des gerade herrschenden Sonnenfleckenzyklus können Astronomen mit ihren statistischen Berechnungen voraussagen [21]. Vorstellbar ist auch, dass der Sonnenfleckenzyklus in der Zukunft nicht gleichförmig verläuft, sondern ins Stocken gerät und kurzfristig Pausen einlegt, wie schon in der Vergangenheit während der Kleinen Eiszeit [2]. Dies kann derzeit in den Computermodellen nicht berücksichtigt werden, da man die Zukunft der solaren Aktivität nicht voraussagen kann.

5. Warum müssen wir uns einschränken?

Warum dann fossile Energie sparen und uns einschränken, wenn noch nicht genau bekannt ist, wie sich das Klima entwickeln wird? Fossile Energieträger können, im Gegensatz zu den Metallen, nicht recycelt werden. Verbrennt man sie bei der Energiegewinnung, sind sie für die Zukunft verloren. Kohle wird in den nächsten 200 Jahren keine Mangelware sein, aber unsere herkömmlichen Erdölquellen neigen sich ab 2025 dem Ende zu [22]. Die Erdgasvorräte werden sich dagegen erst in der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts vermindern.

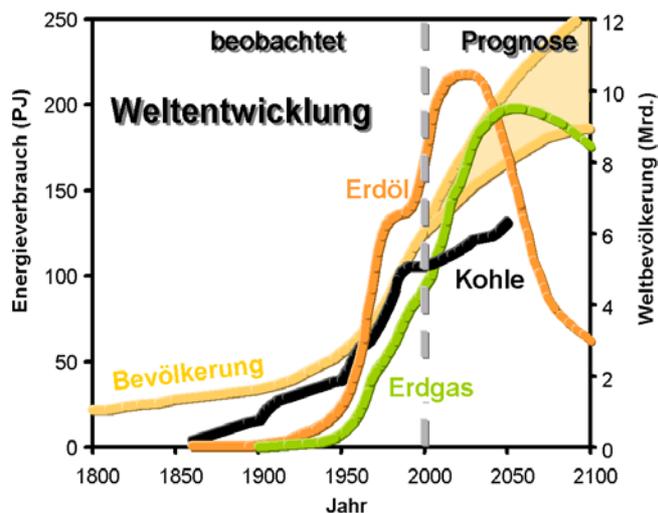


Bild 7: Der Anstieg der Erdbevölkerung wird noch in diesem Jahrhundert dazu führen, dass die leicht zu erreichenden Vorräte an Erdöl und Erdgas abnehmen werden [2].

Ein Grund für die rasche Abnahme der fossilen Energiequellen ist die wachsende Weltbevölkerung und ihr stark steigender Energiebedarf. Um die Zukunftsfähigkeit unserer Gesellschaft zu erhalten, ist ein verantwortungsbewusster Umgang mit Kohle, Erdöl und Erdgas geboten, um unseren Nachfolgenerationen noch einen Spielraum zum eigenverantwortlichen Handeln zu ermöglichen. Aus diesen Gründen und unter Umweltschutzaspekten gilt es, Rohstoffe zu sparen und behutsam mit unseren fossilen Vorräten zu wirtschaften, da wir mittelfristig nicht ohne fossile Energie auskommen werden. Effizienzsteigerung bei der Energiegewinnung und -nutzung ist eine der notwendigen Maßnahmen. Auch wenn wir nicht korrigierend auf klimatische Veränderungen einwirken können, so ist Ressourcenschutz, vernünftiges Verhalten und nachhaltiges Wirtschaften keineswegs überflüssig.

6. Literatur

- [1] Houghton, J. T.; Ding, Y.; Grigg, D.J.; Nogue, M.; van der Linden, P. J.; Xiaosu, D. (Hrsg.): Climate Change 2001, The Scientific Basis, Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 1. Aufl., Cambridge University Press, Cambridge, 2001.
- [2] Berner, U.; Streif, H.(Hrsg.): Klimafakten – Der Rückblick, ein Schlüssel für die Zukunft, 3. Aufl., Schweizerbart Verlag, Stuttgart, 2001.
- [3] Meese, D.A.; Alley, R.B.; Fiacco, R.J.; Germani, M.S.; Gow, A.J.; Grootes, P.M.; Illing, M.; Mayewski, P.A.; Morrison, M.C.; Ram, M.; Taylor, K.C.; Yang, Q.; Zielinski, G.A.: Preliminary depth-agescale of the GISP2 ice core, Special CRREL Report 94-1 (1994).
- [4] Grootes, P.M.; Stuiver, M.; White, J.W.C.; Johnsen, S.J.; Jouzel, J.: Comparison of oxygen isotope records from the GISP2 and GRIP Greenland ice cores, *Nature* 366 (1993), S. 552/554.
- [5] Dansgaard, W.; Johnsen, S.J.; Clausen, H.B.; Dahl-Jensen, D.; Gundestrup, N.S.; Hammer, C.U.; Hvidberg, C.S.; Steffensen, J.P.; Sveinbjörnsdóttir, A.E.; Jouzel, J.; Bond, G.C.: Evidence for general instability of past climate from a 250 kyr ice-core record, *Nature* 264 (1993), S. 218/220.
- [6] Jones, P.D.; New, M.; Parker, D.E.; Martin, S.; Rigor, I.G.: Surface air temperature and its changes over the past 150 years, *Reviews of Geophysics* 37 (1999), S. 173/199.
- [7] Christy, J.R., Spencer, R.W., Braswell. MSU Tropospheric Temperatures: Dataset Construction and Radiosonde Comparisons. *Journal of Atmospheric and Oceanic Research* 17 (2000), S.1153/1170
- [8] <http://cdiac.esd.ornl.gov/trends/co2/contents.htm>
- [9] Soon, W., Baliunas, S.: Proxy climatic and environmental changes of the past 1000 years. *Climate Research* 23 (2003), S. 89/110.
- [10] Stuiver, M., T.F. Braziunas, P.M. Grootes, & G.A. Zielinski.. Is there evidence for solar forcing of climate in the GISP2 oxygen isotope record? *Quaternary Research* 48 (1997), S. 259/266.
- [11] Keigwin, L. D.: The Little Ice Age and Medieval Warm Period in the Sargosso Sea. *Science*, 274 (1996), S. 1504/1508.
- [12] Esper, J., Bosshard, A., Schweingruber, F.H. & Winiger, M.: Tree-rings from the upper timberline in the Karakorum as climatic indicators for the last 1000 years. *Dendrochronologia* 13 (1995), S. 79-88.
- [13] von Grafenstein, U., Erlenkeuser, H., Müller, J., Jouzel, J. & Johnsen, S.: The cold event 8200 years ago documented in oxygen isotope records of precipitation in Europe and Greenland. *Climate Dynamics* 14 (1998), S. 73/81.
- [14] Glaser, R.: Klimageschichte Mitteleuropas. 1000 Jahre Wetter, Klima, Katastrophen. Primus (2001).
- [15] Lean, J.: Solar forcing of climate change in recent millenia. In: Wefer, G. et al. [Hrsg.]: Climate development and history of the North Atlantic Realm (2002), 75/88, Springer.
- [16] Crowley, T.J.: Causes of climate change over the past 1000 years, *Science*, 289 (2000), S. 270/277.
- [17] Zorita, E. et al. : Transient simulation of the climate of the last five centuries with an atmosphere-ocean coupled model: the Late Maunder Minimum and the Little Ice Age. *Terra Nostra* 2003/6: 6. Deutsche Klimatagung (2003), 469/473.
- [18] Friis-Christensen et al. (Hrsg.): Solar variability and climate – Press release. *Space Science Rev.* 94(1-2) (1999), S. 423/424.
- [19] Hiete, M.: Berechnungen der globalen Kohlendioxidemissionen aus der Verbrennung fossiler Energieträger und der Zementherstellung und Modellierung des globalen Kohlenstoffkreislaufs in Bezug auf den Verbleib des emittierten Kohlendioxids, TU Braunschweig, 1999, Diplomarbeit.
- [20] Wigley, T.M.L.: The Kyoto Protocoll: CO₂, CH₄ and climate implications. *Geophys. Res. Lett* 25 (1998), S. 2285/2288.
- [21] Schatten, K.H.; Pesnell, W.D.: An early solar dynamo prediction: Cycle 23 - Cycle 22, *Geophys. Res. Lett* 20 (1993), S. 2275/2278.
- [22] Barthel, F. (Hrsg.): Reserven, Ressourcen und Verfügbarkeit von Energierohstoffen 2002, Rohstoffwirtschaftliche Länderstudien XXVIII, 1. Aufl., BGR, Hannover, 2003.