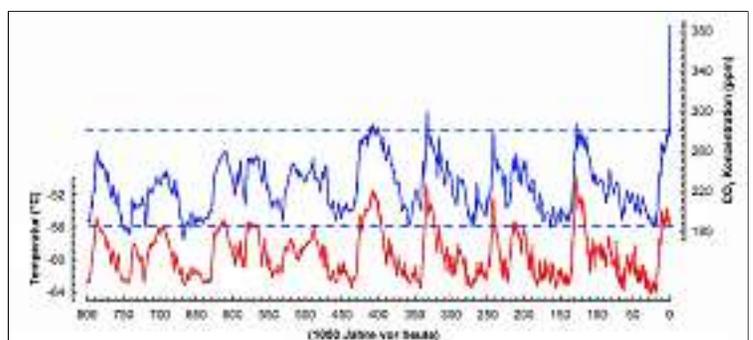


Treibhausgaskonzentrationen in der Langzeitperspektive

Die Erde im Treibhaus

Die Verbrennung von Kohle und Erdöl, die Produktion von Zement sowie die intensive Landnutzung (Abholzung) erwärmen das Klima in den letzten 50 Jahren unnatürlich. Heute wird in der Forschung diskutiert, um wie viel Grad sich die Erde im laufenden Jahrhundert erwärmen wird: Sind es 2 °C, 4 °C oder mehr? Sollten sich zudem Meeresströmungen wie der Golfstrom verändern, hätte dies massive Folgen für Europa. Untersuchungen an Bohrkernen aus dem Eis der Antarktis zeigen, dass sich der Golfstrom in der letzten Eiszeit, die vor 90 000 Jahren begann, mehrmals ein- und ausgeschaltet hat.

Im Rahmen des «European Project for Ice Coring in Antarctica» (EPICA) wurde am Dome Concordia (75° 06' S, 123° 21' E, 3233 m ü. M., -54.5 °C durchschnittliche Jahrestemperatur, 2,5 cm H₂O Niederschlag pro Jahr) ein Eisbohrkern mit einer Länge von 3270 Metern entnommen. Dieses Eis enthält Informationen über die Klimaentwicklung über die letzten 800 000 Jahre [EPICA Community Members, 2004; Jouzel et al., 2007]. Wichtige Ergebnisse der Analyse verschiedener Parameter im Eis und der eingeschlossenen Gase sind jetzt verfügbar und stellen einen einmaligen Kontext dar, in dem die momentanen Veränderungen des Klimasystems interpretiert werden müssen. Die oberen Schichten eines polaren Eisschildes bestehen aus Firn (körnig verschmolzener Schnee), welcher im Kontakt mit der Atmosphäre steht. Luft wird mit der Atmosphäre ausgetauscht und kann in den Zwischenräumen des porösen



1 Rekonstruktion der atmosphärischen CO₂-Konzentrationen über die letzten 800 000 Jahre gemessen in verschiedenen antarktischen Eisbohrkernen, kombiniert mit dem Anstieg von CO₂ während der letzten 50 Jahre, der aus direkten atmosphärischen Messungen bestimmt wurde (blaue Kurve). Die Temperatur in der Antarktis wurde aus Messungen stabiler Wasserisotope abgeleitet (rote Kurve).

Eises ungehindert zirkulieren. In einer Tiefe von etwa 80 Metern verringert der hohe Druck des darüber liegenden Eises zunehmend die Grösse der Poren, bis schliesslich Luftblasen geformt werden. Die Analyse der Luft, die in diesen Bläschen eingeschlossen ist, erlaubt die Rekonstruktion der Konzentration der wichtigsten Treibhausgase CO₂, CH₄ und N₂O in der Vergangenheit. Messungen zeigen, dass die heutigen CO₂-Konzentrationen um 29 % und die von CH₄ um 140 % höher sind als jemals während der vergangenen 800 000 Jahre vor der Industrialisierung [Louergue et al., 2008; Lüthi et al., 2008]. Viele verschiedene und unabhängige Studien zeigen, dass dieser Anstieg primär durch die Verbrennung fossiler Energieträger, durch die Veränderungen der Landnutzung und die Zementproduktion verursacht ist.

Bild 1 zeigt die CO₂-Konzentrationen während der letzten 800 000 Jahre; die Daten wurden aus Messungen der eingeschlossenen Luft mehrerer antarktischer Eisbohrkerne gewonnen [Siegenthaler et al., 2005; Lüthi et al., 2008]. Die CO₂-Zunahme während der letzten 50 Jahre übersteigt bei Weitem das Mass der natürlichen Variabilität. Diese Analysen demonstrieren auch das enge Verhältnis zwischen CO₂-Konzentrationen und Temperaturschätzungen: Während der Eiszeiten lagen die Konzentrationen auf einem tiefen Niveau zwischen 180 bis 200 ppm, wohingegen sie während der Interglaziale auf 280 bis 300 ppm anstiegen. Die heutige Konzentration übersteigt 390 ppm und erhöht sich weiterhin. Aktuelle CO₂-Daten vom Mauna Loa (Hawaii) sind verfügbar unter: www.cmdl.noaa.gov/ccgg/trends.

Autor / Infos

Thomas F. Stocker
Klima und Umweltphysik, Physikalisches Institut
Universität Bern, stocker@climate.unibe.ch

Referenzhinweise auf
www.elektrotechnik.ch, www.hk-gebaeudetechnik.ch

Eine frühere Fassung dieses Artikels ist im Bulletin
1/07 erschienen.

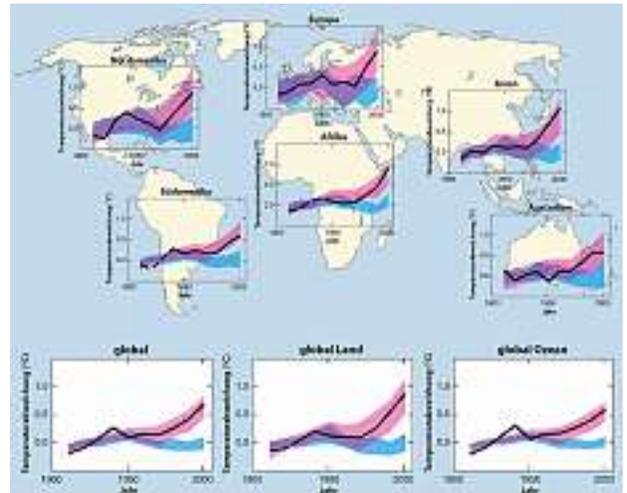


Die Herausforderung des 21. Jahrhunderts

Zweifelsohne wurde der überwiegende Teil der Erwärmung der letzten 50 Jahre primär durch den Anstieg der Treibhausgaskonzentrationen hervorgerufen und ist demzufolge anthropogenen Ursprungs [IPCC, 2007a]. Zahlreiche Modellsimulationen demonstrieren, dass natürliche Veränderungen im Strahlungsantrieb, wie etwa Schwankungen in der Solareinstrahlung oder Vulkanausbrüche, ebenso wie natürliche Kreisläufe nur eine sekundäre Rolle spielen [Stott et al., 2006; Stone et al., 2009]. Die Entwicklung der Oberflächentemperaturen während der letzten 50 Jahre kann quantitativ nur unter Einbeziehung der ansteigenden Treibhausgaskonzentrationen als wesentlicher Beitrag zum Strahlungsantrieb erklärt werden (Abb. 2).

Die *Klimasensitivität*, das heisst die mittlere globale Erwärmung, die durch eine Verdopplung der atmo-

sphärischen CO₂-Konzentrationen hervorgerufen wird, wenn sich das Klimasystem wieder im Gleichgewichtszustand befindet, ist eine fundamentale Grösse zur Beurteilung des Einflusses der Treibhausgase, welche nun durch verbesserte Modellsimulationen, einem genaueren Verständnis der Klimaprozesse und durch detailliertere paläoklimatische Rekonstruktionen in vielen Regionen mit höherer Präzision bestimmt werden kann [Knutti and Hegerl, 2008]. Diese beiden Resultate stützen und verfestigen die Basis, auf der Berechnungen des zukünftigen Klimawandels beruhen. Eine Frage fundamentaler Wichtigkeit für politische Entscheidungsträger ist die Wahrscheinlichkeit, ein vereinbartes Klimaerwärmungsziel nicht zu verfehlen. Die Beantwortung dieser Frage kann nur mithilfe von Klimamodellen angegangen werden, die eine grosse Anzahl an Simulationen zulassen. Knutti et al. [2005] verwendeten ein Klima-



2 Temperaturveränderungen des 20. Jahrhunderts auf den sechs Kontinenten. Messungen (schwarze Kurven) werden mit Simulationen verschiedener Klimamodelle verglichen, welche zum einen nur Veränderungen in der solaren Einstrahlung und Vulkanausbrüche berücksichtigen (blaue Bänder) und zum anderen auch die beobachtete Zunahme der Treibhausgas- und Aerosolkonzentrationen mit einbeziehen (rote Bänder) [IPCC, 2007b].

modell reduzierter Komplexität der Universität Bern, Schweiz [Stocker et al., 1992] und nahmen eine geschätzte Wahrscheinlichkeitsdich-

Spenglerei- und Dachbedarf



Mit dem umfassenden Angebot für Spengler und Polybauer bietet Debrunner Acifer alles aus einer Hand. Produkte zu den Themen Halbfabrikate, Spenglerbleche, Dachaufbauten, Steil- und Flachdächer, den Baustoffen mit Dachbegrünungen und Flüssigkunststoffsystemen, sowie zum Blitzschutz nach den neuen SEV- Leitsätzen 4022.

Sie finden bei Debrunner Acifer alles rund um die Gebäudetechnik einfach und bequem unter einem Dach.

Überall in Ihrer Nähe!

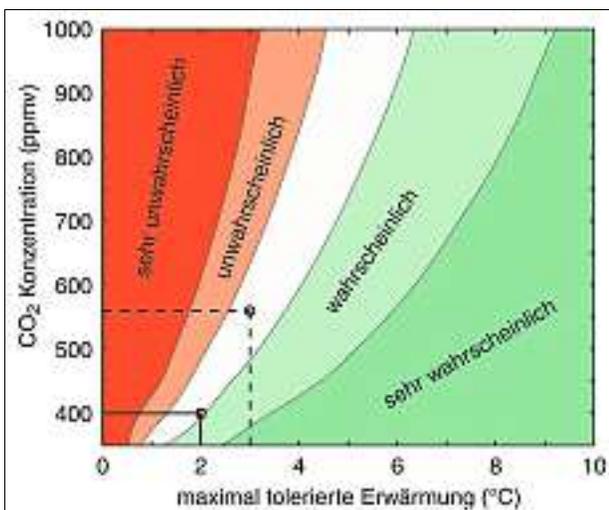
Debrunner Acifer

klöckner & co multi metal distribution

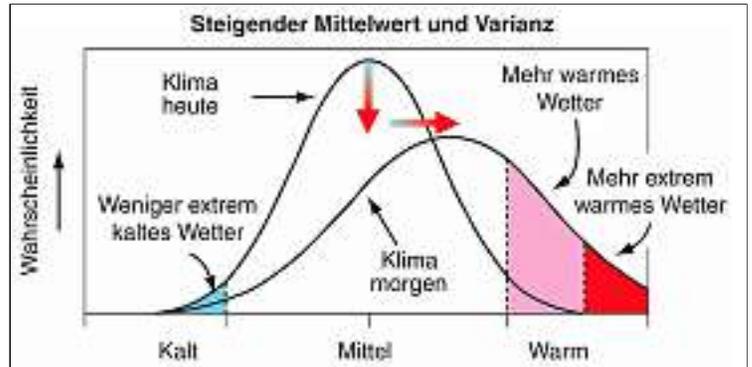
www.d-a.ch



tefunktion für die Klimasensitivität an [Knutti et al., 2002]. Die Resultate sind in Bild 3 zusammengefasst. Sie zeigen, dass das Klimaziel, die globale Klimaerwärmung auf 2 °C zu begrenzen, wie in der Kopenhagener Vereinbarung [2009] vorgeschlagen, erreicht werden kann. Dies würde aber eine rasche Realisierung und eine effektive und progressive Reduktion der CO₂-Emissionen voraussetzen. Eine Obergrenze der atmosphärischen Konzentrationen auf einem Stand doppelt so hoch wie dem vorindustriellen Niveau, das heisst etwa 560 ppm, würde einem Klimaerwärmungsziel von 3 °C entsprechen. Durch diese Berechnungen wird offensichtlich, dass die Herausforderung rapide wächst, wenn sich der Anstieg der Treibhausgaskonzentrationen aufgrund von fehlenden, unvollständigen oder aufgeschobenen verbindlichen Zielen, oder korrigierten weniger strengen Temperaturgrenzen weiter fortsetzt. Eine globale Erwärmung von 2 °C wird oft als tolerabel angesehen und wurde in der Kopenhagener Vereinbarung [2009] als Klimaziel festgelegt. Allerdings müssen vier Punkte berücksichtigt werden: Erstens ist es der regionale Klimawandel, der für die Umwelt und Gesellschaft relevant ist, während die



3 Abschätzung der Wahrscheinlichkeit, dass für eine vorgegebene CO₂-Konzentration die maximale Erwärmung nicht überschritten wird. «Sehr unwahrscheinlich» entspricht < 10 %, «unwahrscheinlich» < 33 %, «wahrscheinlich» > 66 %, und «sehr wahrscheinlich» > 90 % [Abb. aus Knutti et al., 2005].



4 Schematische Wahrscheinlichkeitsverteilung von Sommertemperaturen. Eine kleine Veränderung des Mittelwertes (Verschiebung der Kurve nach rechts) führt zu einer Abnahme der Häufigkeit kalter Sommer. Das Auftreten warmer Sommer wird um mehrere Grössenordnungen zunehmen (die rote Fläche vergrössert sich stark). Die mögliche Verbreiterung der Verteilung, das heisst eine Zunahme der Variabilität, würde diesen Effekt verstärken [Abb. aus IPCC, 2007c].

globale Temperaturveränderung lediglich ein abstraktes Mass darstellt. Aufgrund fundamentaler physikalischer Prozesse wird sich die Erwärmung in Gebieten mit saisonaler Schnee- und Eisbedeckung verstärken. Dieses Phänomen wird als Schnee-/Eisalbedo-Feedback bezeichnet. Besonders in den Breiten nördlich von etwa 60° N wird die Erwärmung um mindestens einen Faktor 2 verstärkt sein, aber auch in alpinen Gebieten ist dieser Prozess von Bedeutung. Gegen Ende des 21. Jahrhunderts wird sowohl das grossräumige Abschmelzen des arktischen Meereises [Stroeve et al., 2007] als auch ein beschleunigter Massenverlust des grönländischen Eisschildes erwartet [Velicogna, 2009]. Dieser Feedback-Mechanismus ist unter anderem für eine verkürzte Winterperiode in den alpinen Regionen verantwortlich. Auch wenn das sehr ambitionierte Klimaziel von 2 °C erreicht werden sollte, würden Tourismus, Wasserwirtschaft und Wasserkraftwerke in diesen Regionen stark betroffen sein. Zweitens hat die Zunahme von Extremereignissen die Aufmerksamkeit der Öffentlichkeit erregt, weil sie kostenintensiv sind und eine unmittelbare Belastung darstellen. Einfache statistische Überlegungen zeigen, dass die Häufigkeit von Extremereignissen sehr sensibel auf Veränderungen des Durchschnittswertes reagiert. Daher drücken sich Veränderungen im Durchschnitts-

klima in veränderten Statistiken der Extremereignisse aus. Zur Illustration soll ein Beispiel angefügt werden. Eine kleine Zunahme der durchschnittlichen Sommertemperaturen, schematisch illustriert in Abbildung 4, führt zu stark ansteigenden Wahrscheinlichkeiten für das Auftreten von Hitzewellen [Meehl et al., 2007]. Berechnungen zeigen, dass die historische Hitzewelle von 2003 bereits der globalen Temperaturerwärmung zugeschrieben werden kann [Stott et al., 2004]. Schätzungen zum zukünftigen Auftreten solcher Hitzeextreme zeigen, dass Hitzewellen mit Temperaturmaxima ähnlich oder höher als die von 2003 gegen Ende des 21. Jahrhunderts etwa 2- bis 3-mal pro Dekade auftreten könnten [Schär et al., 2004]. Paleoklimatische Rekonstruktionen unterstützen diese Analysen und deuten darauf hin, dass die Hitzewelle von 2003 in den letzten 500 Jahren einmalig war [Luterbacher et al., 2004]. Hitzewellen, die über einen längeren Zeitraum auftreten, stellen einen ernst zu nehmenden Stressfaktor für Ökosysteme und Menschen dar. Kürzlich erstellte Projektionen, die mit regionalen Klimamodellen durchgeführt wurden, deuten darauf hin, dass ein starker Anstieg der heissen Sommertage und der tropischen Nächte, bei denen die maximalen Tagestemperaturen 35 °C übersteigen und die minimalen Nachttemperaturen über



20 °C liegen, in Europa stattfinden wird [Fischer and Schär, 2011].

Drittens müssen auch die Langzeitveränderungen berücksichtigt werden. Die bereits emittierten Treibhausgase haben eine sehr lange Residenzzeit in der Atmosphäre (mehrere 100 Jahre). Darüber hinaus werden etwa 15% des emittierten CO₂ für viele Jahrhunderte in der Atmosphäre verbleiben. Aufgrund seiner thermischen Trägheit befindet sich der Ozean fern von einem Gleichgewichtszustand. Der Anstieg des Meeresspiegels wird sich ebenfalls über mehrere 100 Jahre fortsetzen, auch wenn die Emissionen bereits heute reduziert würden. Dieses Phänomen kommt durch die sehr langsame Aufnahme von Wärme in die Ozeane zustande. Dieses sogenannte «climate commitment» impliziert, dass wir bis heute noch nicht alle Auswirkungen vergangener Treibhausgasemissionen beobachtet haben und

somit ein zunehmender Anteil von unabwendbarem Klimawandel noch bevorsteht. Insbesondere wird der unvermeidbare Klimawandel lang andauernde Auswirkungen auf das regionale Klima, zum Beispiel auf den Anstieg des Meeresspiegels, die Veränderung der Statistik der Extremereignisse, den Wasserkreislauf und die Wasserressourcen haben [Solomon et al., 2009].

Viertens haben neueste Forschungen gezeigt, dass mehrere Komponenten des Klimasystems nichtlineares Verhalten und Wendepunkte aufweisen [Meehl et al., 2007]. Eines der bekanntesten Beispiele ist die Fortsetzung des Golfstroms nach Norden. Eine rapide und starke Erwärmung hätte das Potenzial, die Zirkulation zu destabilisieren, welches eine starke Reduktion oder sogar ein Zusammenbrechen zur Folge hätte [Stocker and Schmittner, 1997]. Modellsimulationen zeigen

die Möglichkeit einer eisfreien Arktis auf, sollten sich die Emissionen von fossilen Brennstoffen mit den momentanen hohen Raten fortsetzen. Kürzlich durchgeführte Simulationen deuten darauf hin, dass es einen Schwellenwert von etwa 1,9 bis 4,9 °C in der Erwärmung gibt, bei dessen Überschreiten das komplette Abtauen grönländischen Eisschildes unvermeidbar würde [Gregory and Huybrechts, 2006]. Auch in der Vegetation, insbesondere im tropischen Regenwald, könnten solche Schwellenwerte mit sich fortsetzender Erwärmung erreicht werden [Cox et al., 2004].

Gibt es eine «magische» Lösung?

Patentlösungen, die für die globale Klimaerwärmung regelmässig vorgeschlagen werden, machen regelmässig Schlagzeilen in den Medien. Allerdings können die grossen Mengen der Treibhausgase, die in

«Die Kompakten» DIZ-D6...-kWh-Zähler



MID-Konform

M-Bus

LON-Bus

RoHS-Konform

Messgenauigkeit Klasse 1, Lage unabhängiger Einbau
Gegen Schlag und Erschütterungen unanfälliges Gehäuse

Direkt und über Messwandler
Einfach-/Doppeltarif
Momentanwertanzeige für P, I + U

ELKO
SYSTEME AG

Messgeräte • Systeme • Anlagen
Zur Kontrolle und Optimierung des Verbrauches elektrischer Energie
Brüelstrasse 47 CH-4312 Magden Telefon 061-845 91 45 Telefax 061-845 91 40
E-Mail: elko@elko.ch Internet: www.elko.ch

Pumpen ab der Stange sollte sich keiner leisten.



Denn wer Pumpen ab der Stange kauft, verzichtet auf die Gewissheit, sein Pumpenproblem auch langfristig gelöst zu haben.



Nur Brunner garantiert mit seiner langen Erfahrung, dass Sie aus dem riesigen

Angebot an verschiedenen Pumpen präzise jene kaufen, die beides sind: **Preiswert und richtig.**

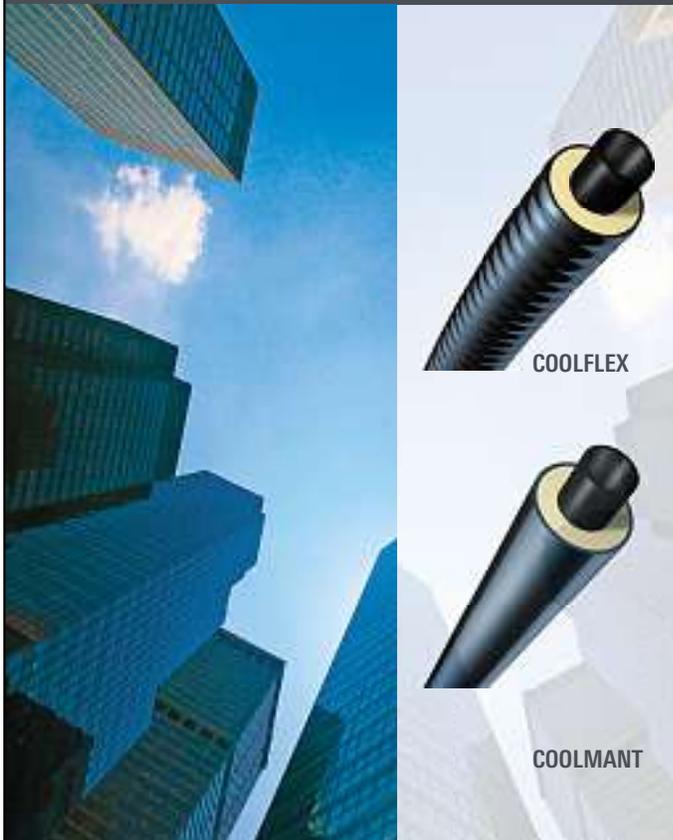
BRUNNER
PUMPEN

BRUNNER AG · Maschinen und Pumpen

Brunnergässli 1 - 5 · CH-8302 Kloten
Tel. 044 814 17 44 · Fax 044 814 17 75
mail@brunnerpumpen.ch · www.brunnerpumpen.ch

COOLMANT / COOLFLEX

Energie- und kosteneffiziente Systeme für die Fernkühlung



www.pipesystems.com

COOLFLEX

für kleinere Fernkühlungsnetze (für Hausanschlüsse, Wohnsiedlungen, Hotelresorts etc.)
-20 °C bis +40 °C
DN 20-DN 125

COOLMANT

für grossräumige Fernkühlungsnetze (städtische Bauten, Bürokomplexe, Spitäler, Shoppingcenter etc.)
-20 °C bis +40 °C
DN 125-DN 315

A company of the
BRUGG Group

BRUGG PIPESYSTEMS
Flexible solutions

Fernkühlung hat Zukunft.

Die Nutzung von Abwärme aus einer Vielzahl möglicher Energiequellen für die Kälteerzeugung ist hochgradig energieeffizient und umweltfreundlich. Mit dem Fernkühlungssystem COOLFLEX und COOLMANT von Brugg wird die Vision energiesparender und schadstoffarmer Kälteversorgung Realität.

Rufen Sie uns an!

den letzten 250 Jahren ausgestossen wurden, nicht in wenigen Jahren aus der Atmosphäre entfernt werden. Kurzfristige Massnahmen, wie das Einleiten von Treibhausgasen in stillgelegte Minen oder das Aufforsten einzelner Landstücke, sind aussichtslose Bemühungen im Vergleich zu den riesigen Mengen der kumulativen Emissionen bis heute und der vorhergesagten Emissionen in den kommenden Dekaden. Besondere Beunruhigung verursachen neue Vorschläge der gezielten Klimamodifizierung, auch als Geo-Engineering bezeichnet, kürzlich zusammengefasst im Bericht Geo-Engineering the Climate [2009]. Auch wenn es eine Motivation war, während den Anfängen der gekoppelten Klimamodellierungen zu quantifizieren, wie man die hohen nördlichen Breiten am besten erwärmen könne, um bewohnbares Land zu gewinnen [Budyko, 1969; Sellers, 1969], so ist unser gegenwärtiges Verständnis der direkten und indirekten Effekte der spezifischen Geo-Engineering-Techniken nicht ausreichend, um rationale Entscheidungen hierauf zu basieren. Zum Beispiel haben wir kein robustes Verständnis davon, wie die Deposition von Sulfataerosolen, welche als effektives Mittel zur Erzeugung einer globalen Abkühlung vorgeschlagen wurde, den hydrologischen Kreislauf und somit das Regionalklima beeinflussen könnte. Sekundäre Effekte, wie etwa saurer Regen, und weitere potenzielle Auswirkungen müssten ebenfalls berücksichtigt werden. Neben dem fehlenden physikalischen Verständnis müssen auch schwerwiegende Fragen, wie die der Steuerung und die der Langzeitstabilität, beachtet werden, welche sich stellen, wenn Lösungsvorschläge auf Geo-Engineering beruhen.

Daher können nur Langzeitstrategien und globale Massnahmen, wie die Zunahme der Effektivität bei der Nutzung fossiler Energieträger, und die rapide und gemeinschaftliche weltweite Reduktion der Emissionen, es uns ermöglichen, Klimaziele zu erreichen, sobald diese beschlossen und als globale und verpflichtende Abkommen implementiert werden. Es ist wichtig, anzuerkennen, dass die momentan definierten Klimaziele nur erreicht werden können, wenn sich schlussendlich alle Länder und Industriezweige an einer wahrhaftig globalen Strategie zur Emissionsreduktion beteiligen [Allen et al., 2009; Meinshausen et al., 2009; Schmidt and Archer, 2009].

Neben diesen unabkömmlichen Mitigationsmassnahmen, welche auf die Ursachen des Klimawandels eingehen, werden ausserdem Massnahmen zur Anpassung an die Auswirkungen der Emissionen der Vergangenheit und an die assoziierten Klimaziele nötig sein. Anpassung verlangt regional sehr spezifische Massnahmen. Nicht nur die Mitigation des Klimawandels (wie oft behauptet), sondern auch die Anpassung an den Klimawandel wird mit hohen Kosten und der Notwendigkeit von Veränderungen und Investitionen in die Infrastruktur verbunden sein. Mit einer hohen Wahrscheinlichkeit werden sich diese Kosten nicht linear zu der Erwärmung verhalten. Eher werden eine stärkere Erwärmung und die entsprechenden Veränderungen unverhältnismässig hohe Kosten für die Adaption verursachen.

Von unserem physikalischen Verständnis ausgehend ist allerdings eine Sache klar: Ob wir mit einer globalen Erwärmung von 2 °C oder 4 °C konfrontiert werden, wird durch die Menge der Treibhausgase, die von heute an emittiert werden, bestimmt und ist daher eine direkte Konsequenz unserer Entscheidungen auf lokaler, regionaler und globaler Ebene. ■



Referenzhinweise

Allen, M.R., et al., Warming caused by cumulative carbon emissions towards the trillionth tonne, *Nature*, 458, 1163-1166, 2009.

Budyko, M.I., The effect of solar radiation variations on the climate of the earth, *Tellus*, 21, 611-619, 1969.

Copenhagen Accord, United Nations Framework Convention on Climate Change, 18. December 2009, 2009.

Cox, P.M., et al., Amazonian forest dieback under climate-carbon cycle projections for the 21st century, *Theor. Appl. Clim.*, 78, 137-156, 2004.

EPICA Community Members, Eight glacial cycles from an Antarctic ice core, *Nature*, 429, 623-628, 2004.

Fischer, E.M., and C. Schär, Consistent geographical patterns of changes in high-impact European heatwaves, *Nature Geosci.*, 3, 398-403, 2010.

Geo-Engineering the Climate, The Royal Society, London, 84 pp., 2009. Gregory, J.M., and P. Huybrechts, Ice-sheet contributions to future sea-level change, *Phil. Trans. Roy. Soc. Lond. Ser. A*, 364, 1709-1731, 2006.

Holland, M.M., et al., Future abrupt reductions in the summer Arctic sea ice, *Geophys. Res. Lett.*, 33, L23503, 2006.

IPCC, Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, 2007a.

IPCC, Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Summary for Policymakers., 18 pp., www.ipcc.ch, 2007b.

IPCC, Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Technical

Summary., 73 pp., www.ipcc.ch, 2007c.

Jouzel, J., et al., Orbital and millennial Antarctic climate variability over the past 800,000 years, *Science*, 317, 793-796, 2007.

Knutti, R., and G.C. Hegerl, The equilibrium sensitivity of the Earth's temperature to radiation changes, *Nature Geosci.*, 1, 735-743, 2008.

Knutti, R., et al., Probabilistic climate change projections for CO₂ stabilization profiles, *Geophys. Res. Lett.*, 32, L20707, 2005.

Knutti, R., et al., Constraints on radiative forcing and future climate change from observations and climate model ensembles, *Nature*, 416, 719-723, 2002.

Loulergue, L., et al., Orbital and millennial-scale features of atmospheric CH₄ over the last 800,000 years, *Nature*, 453, 383-386, 2008.

Luterbacher, J., et al., European seasonal and annual temperature variability, trends, and extremes since 1500, *Science*, 303, 1499-1503, 2004.

Lüthi, D., et al., High resolution carbon dioxide concentration record 650,000-800,000 years before present, *Nature*, 453, 379-382, 2008.

Meehl, G.A., et al., Global Climate Projections, in *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, edited by S. Solomon, et al., pp. 747-845, Cambridge University Press, 2007.

Meinshausen, M., et al., Greenhouse-gas emission targets for limiting global warming to 2 degrees C, *Nature*, 458, 1158-1163, 2009.

Robock, A., et al., Regional climate responses to geoengineering with tropical and Arctic SO₂ injections, *J. Geophys. Res.*, 113, D16101, 2008.

Schär, C., et al., The role of increasing temperature variability in European summer heat waves, *Nature*, 427, 332-336, 2004.

Schmidt, G.A., and D. Archer, Too much of a bad thing, *Nature*, 458, 1117-1118, 2009.

Sellers, W.D., A global climatic model based on the energy balance of the earth-atmosphere system, *J. Appl. Met.*, 8, 392-400, 1969.

Siegenthaler, U., et al., Stable carbon cycle-climate relationship during the Late Pleistocene, *Science*, 310, 1313-1317, 2005.

Solomon, S., et al., Irreversible climate change due to carbon dioxide emissions, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 106, 1704-1709, 2009.

Stocker, T.F., and A. Schmittner, Influence of CO₂ emission rates on the stability of the thermohaline circulation, *Nature*, 388, 862-865, 1997.

Stocker, T.F., et al., A zonally averaged, coupled ocean-atmosphere model for paleoclimate studies, *J. Clim.*, 5, 773-797, 1992.

Stone, D.A., et al., The detection and attribution of human influence on climate, *Ann. Rev. Env. Resour.*, 34, 1-16, 2009.

Stott, P.A., et al., Observational constraints on past attributable warming and predictions of future global warming, *J. Clim.*, 19, 3055-3069, 2006.

Stott, P.A., et al., Human contribution to the European heatwave of 2003, *Nature*, 432, 610-613, 2004.

Stroeve, J., et al., Arctic sea ice decline: Faster than forecast, *Geophys. Res. Lett.*, 34, L09501, 2007.

Velicogna, I., Increasing rates of ice mass loss from the Greenland and Antarctic ice sheets revealed by GRACE, *Geophys. Res. Lett.*, 36, L19503, 2009. ■