

HIRZEL

JAHRBUCH ÖKOLOGIE

Die Klima- Manipulateure

Rettet uns Politik oder Geo-Engineering?



Die Klima-Manipulateure

DAS JAHRBUCH ÖKOLOGIE

- informiert über die ökologische Situation und die Belastungstrends in den verschiedenen Bereichen der natürlichen Umwelt
- analysiert die staatliche und internationale Umweltpolitik
- bringt einen Disput zu einem wichtigen umweltpolitischen Thema
- dokumentiert historisch bedeutsame, umweltbezogene Ereignisse und Initiativen
- beschreibt positive Alltagserfahrungen und entwirft Visionen für eine zukunftsfähige Welt
- wendet sich an eine sensible Öffentlichkeit, die sich der Umweltkrise bewusst ist und nach tragfähigen Alternativen im Umgang mit der Natur sucht
- ist einem breiten Ökologiebegriff verpflichtet, der im Alltag verankert ist und das Verhältnis von Mensch und Natur, von Gesellschaft und Umwelt umfasst.

BEIRAT

Christine Ax, Hamburg; Thea Bauriedl, München; Jan C. Bongaerts, Freiburg; Paul J. Crutzen, Mainz; Hartmut Graßl, Hamburg; Rainer Grießhammer, Freiburg; Gjalt Huppes, Leiden; Martin Jänicke, Berlin; Ruth Kaufmann-Hayoz, Bern; Stephan Kohler, Berlin; Jobst Kraus, Bad Boll; Hans-Jochen Luhmann, Wuppertal; Barbara Mettler-von Meibom, Essen; Klaus M. Meyer-Abich, Hamburg; Benno Pilardeaux, Berlin; Werner Schenkel, Berlin; Walter Spielmann, Salzburg; Michael Succow, Greifswald; Barbara Urmüßig, Berlin; Christine von Weizsäcker, Bonn.

BEGLEITENDE INSTITUTE

BAUM – Bundesdeutscher Arbeitskreis für umweltbewusstes Management, Hamburg; Deutsche Umweltstiftung, Gernsheim; Ecologic – Institut für internationale Umweltpolitik, Berlin; Forschungsstelle für Umweltpolitik, Berlin; ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung, Heidelberg; IFF – Institut für Soziale Ökologie, Wien; INFU – Institut für Umweltkommunikation, Lüneburg; IÖW – Institut für Ökologische Wirtschaftsforschung, Berlin; ISOE – Institut für sozial-ökologische Forschung, Frankfurt a.M.; IZT – Institut für Zukunftsforschung & Technologiebewertung, Berlin; Öko-Institut, Freiburg/Darmstadt/Berlin; UfU – Unabhängiges Institut für Umweltfragen, Berlin/Halle; Umweltbundesamt, Berlin/Dessau; Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie; WZB – Wissenschaftszentrum, Berlin.

Die Klima-Manipulateure

Rettet uns Politik oder Geo-Engineering?

Herausgegeben von Günter Altner, Heike Leitschuh, Gerd Michelsen,
Udo E. Simonis und Ernst U. von Weizsäcker



REDAKTION

Prof. Dr. Dr. h.c. Udo E. Simonis, Wissenschaftszentrum Berlin (WZB)
Reichpietschufer 50, 10785 Berlin
Tel.: (030) 25491-245; Fax: (030) 25491-247
E-Mail: simonis@wzb.eu
www.jahrbuch-oekologie.de

Ein Markenzeichen kann warenrechtlich geschützt sein, auch wenn ein Hinweis auf etwa bestehende Schutzrechte fehlt.

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

ISBN 978-3-7776-2110-4

ISSN 0940-9211

Jede Verwertung des Werkes außerhalb der Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Übersetzungen, Nachdruck, Mikroverfilmung oder vergleichbare Verfahren sowie für die Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen.

Gedruckt auf FLY spezialgeglättet Vol. 1,2, FSC-Mix, zertifiziert GFA COC 001147

© 2010 S. Hirzel Verlag

Birkenwaldstraße 44, 70191 Stuttgart

Printed in Germany

Einbandgestaltung: deblik, Berlin

Foto: ollirg – Fotolia

Druckerei: Druckerei Djurcic, Schorndorf

Bindung: Schallenmüller, Stuttgart

www.hirzel.de

Zu diesem Jahrbuch	9
--------------------------	---

I. Klimamanipulation – Ersatzhandlung

<i>Patrick Eickemeier & Hans Joachim Schellnhuber</i> Kippelemente – Achillesfersen im Klimasystem	11
<i>Konrad Ott</i> Kartierung der Argumente zum Geoengineering	20
<i>Paul J. Crutzen</i> Erdabkühlung durch Sulfatinjektionen in die Stratosphäre	33
<i>Wera Leujak, Harald Ginzky, Jens Arle & Ulrich Claussen</i> Erdabkühlung durch Eisendüngung der Ozeane	40
<i>Steve Rayner</i> Geoengineering Governance – Regulierung der Klimamanipulation	51
<i>Michael Hauhs & Holger Lange</i> Modelle von Geoengineering – theoretische Grundlagen	65

II. Klimapolitik – Chefsache ohne Schub

Vorrede zur Integrität der Wissenschaft	81
Klimawandel und die Integrität der Wissenschaft – offener Brief	82
<i>Inge Paulini</i> Mit Klimagerechtigkeit aus der Verhandlungskrise	85
<i>Sascha Müller-Kraenner</i> Europas Klimadiplomatie vor dem Neuanfang	94

<i>Stormy-Annika Mildner & Jörn Richert</i>	
„Going Green Slowly“ – die US-Klimapolitik	101
<i>Susanne Dröge</i>	
BASIC – die neuen Giganten beim Klimapoker	112
<i>Udo Kuckartz</i>	
Klimabewusstsein in Europa: Liegt Deutschland vorn?	128
<i>Martin Jänicke</i>	
Das Innovationstempo in der Klimapolitik forcieren!	138
Klimawandel löst Länderkonflikt – Insel im Meer verschwunden	148
<i>Sylvia Kotting-Uhl</i>	
Klimaschutz: Abschied nehmen von der Kernfusion	149

III. Perspektiven & Innovationen

<i>Peter-Christoph Storm</i>	
Umweltrecht im Klimawandel	156
<i>Bettina Brohmann</i>	
Basisinnovationen anderer Art: Energiewende, Auktionskultur	167
<i>Hanne Tügel</i>	
Ökogemeinde Totnes in England	173
Das Garagendach als Tankstelle für Elektroautos	180
<i>Gerhard Trommer</i>	
Kinder in der Natur – Natur in Kindern	182
<i>René Zimmer & Iken Draeger</i>	
Jugend und Klima: Was erwarten Jugendliche von der Zukunft?	193
<i>Christiane Ax</i>	
Arbeit für ein Konzept vom „guten Leben“	201

Michael Müller & Peter Stutz
Auf einer langen Welle zur Ökologie – Kondratieff weist den Weg .208

Edgar Göll
Nachhaltige Entwicklung in der Wüste –Beispiel SEKEM214

Stefan Kreutzberger
„Grüntünchen“ – wie Firmen für ihr Image manipulieren220

IV. Vor-Denker & Vor-Reiter

Heike Leitschuh
Angelika Zahrt – die analytische Aktivistin226

Gertrud Lenz
Beate Weber – die umweltpolitische Kämpferin229

Günter Altner
Joseph Beuys – der Künstler und Schamane232

V. Umweltinstitutionen

Forum für Verantwortung235

Initiative „Stiften für die Umwelt“236

VI. Ökologische Trends

Christopher Flavin
Globale ökologische Trends – Perspektive 2011237

Autorinnen und Autoren246

Zu diesem Jahrbuch

Der Philosoph Peter Sloterdijk meinte kürzlich, die Menschen seien „Zukunftsatheisten“ – sie glaubten nicht an das, was sie wissen. Das mag übertrieben sein, doch wenn man diese allgemeine Vermutung auf die Klimapolitiker überträgt, könnte er durchaus recht haben. Trotz allen Wissens über die Ursachen und die möglichen Folgen des Klimawandels ließen sie die große Chance des Klimagipfels in Kopenhagen ungenutzt verstreichen. Während man allseits ein deutliches Signal der Staatengemeinschaft erhofft hatte, mit dem immer wieder angekündigten Aufbruch in eine globale Kultur der Nachhaltigkeit und einem neuen Klimavertrag endlich ernst zu machen, hat man sich lediglich auf eine Absichtserklärung verständigt, den weiteren Anstieg der Erdtemperatur auf durchschnittlich 2 °C beschränken zu wollen. Belastbare Beschlüsse, mit welchen konkreten Maßnahmen und welchen Institutionen man dieses Ziel zu erreichen gedenkt, wurden auf später vertagt, sodass das Ziel nun selber in Frage steht. Angesichts dieses Debakels mangelnder globaler Koordination und Kooperation könnte sich bei den Menschen in der Tat hoffnungslose Unzufriedenheit ausbreiten, ein Mehltau aus Apathie und Depression, ein Gefühl der Machtlosigkeit, weil die Politik selbst nicht mehr in der Lage zu sein scheint, gestalterisch tätig zu werden. Es könnte aber auch sein, dass wir durch diese enttäuschende Niederlage der Weltpolitik in eine vor-revolutionäre Situation neuer Art geraten sind. Wenn nämlich klar(er) wird, dass es von jetzt ab um hohe Kosten der Anpassung an den Klimawandel, um zunehmende internationale Konflikte, um territoriale und biologische Fortexistenz – und damit um Leben und Tod geht. Revolutionen bieten dann bekanntlich zweierlei: fundamentale Krise oder Eröffnung realer Chancen, Kollaps oder Suche nach einem neuen Gleichgewicht.

Die Herausgeber dieses Jahrbuchs sind mehrheitlich strukturelle Optimisten. Und so haben sie die Hoffnung auf eine bessere Klimapolitik und ernsthaftere Klimapolitiker noch nicht aufgegeben. In den Blickpunkt (*Teil I*) möchten sie jedoch die Möglichkeit einer bedeutungsreichen, problembehafteten Ersatzhandlung rücken, nämlich die, dass Ingenieure das Heft des Handelns in die Hand nehmen könnten: das Thema „Climate Geoengineering“, die großtechnische Klimama-

nipulation hat erheblichen Auftrieb erhalten. In den USA ist dazu eine rege Diskussion im Gange, in England hat eine Royal Commission einen umfassenden Bericht erstellt, deutsche Institute waren an Feldversuchen der Ozeandüngung beteiligt. Es war nicht leicht, geeignete Autoren zu dieser grundsätzlichen Alternative zu finden, doch ist uns gewiss ein guter Einstieg in das Thema gelungen, das zwei Ausprägungen gefunden hat: *Solar Radiation Management* (SRM), die Beeinflussung der Sonneneinstrahlung und *Carbon Dioxide Removal* (CDR), die CO₂-Entfernung aus der Atmosphäre, und das mit zwei Maßnahmebündeln angegangen bzw. betrieben werden soll: mit *ecosystem enhancement*, der künstlichen Stimulierung natürlicher Prozesse und mit *black-box engineering*, direkten technischen Eingriffen zum Einfangen von CO₂. Das Argumentationsmuster Pro und Contra Climate Geoengineering (Klimamanipulation) bedarf der sorgfältigen und kritischen Kartierung – und dazu möchte dieses Jahrbuch beitragen.

Doch was geschieht mit der Klimapolitik? Sie ist zur Chefsache geworden, aber ohne Schub (*Teil II*). Ob die Krisenerfahrung mit „Deepwater Horizon“ daran etwas ändern wird, bleibt offen. Was noch geht, was sich entwickeln könnte, dazu finden sich in diesem Buch eine Reihe von Betrachtungen – in Sonderheit solche zu neuen Akteuren auf der internationalen Ebene und zu neuartigen Akteurskonstellationen, aber auch zu den klimapolitischen Bremsern und Blockierern.

Gründe genug, nach Perspektiven anderer Art Ausschau zu halten, nach solchen in Recht, Wirtschaft und Gesellschaft (*Teil III*). Unter Begriffen wie Lokale Energiewende, Transition Towns, Arbeit an Konzepten zum guten Leben, Umweltgerechtigkeit, Natur mit Kindern und Jugendlichen sind viel versprechende ökologische Rettungskräfte am Werk, denen allerdings vielfach ein „Grüntünchen“ gegenüber steht, der listenreiche Versuch einer Manipulation der anderen Art – der Imagemanipulation.

Und was ist sonst noch in diesem Buch zu finden? Natürlich auch die Traditionsrubriken der Vor-Denker und Vor-Reiter (*Teil IV*), der Umweltinstitutionen (*Teil V*) und der Ökologie in Zahlen (*Teil VI*), diesmal mit fundamentalen globalen ökologischen Trends.

Herausgeber, Redakteur, Lektorin und Korrektorin wünschen sich natürlich auch für das JAHRBUCH ÖKOLOGIE 2011 wiederum viele Leserinnen und Leser, Kritik, wo nötig, und Lob, wenn möglich.

Die Herausgeber

Im Juli 2010

I. Klimamanipulation – Ersatzhandlung

Patrick Eickemeier & Hans Joachim Schellnhuber

Kippelemente – Achillesfersen im Klimasystem

Kippelemente sind Bestandteile des Klimasystems von mindestens sub-kontinentaler Größe. Dazu gehören Strömungsstrukturen, Eiskörper und Lebensräume, die schon durch kleine externe Störungen in einen neuen Zustand versetzt werden können. Der Übergang nach dem Überschreiten eines systemspezifischen Kippunktes kann fließend oder sprunghaft erfolgen und unumkehrbar sein. Seine Umweltauswirkungen sind weit-reichend und könnten die Lebensgrundlagen vieler Millionen Menschen gefährden.

„Wo das Klima kippen könnte“, „Forscher identifizieren neun kritische Klima-Krisenzonen“ und „Das globale Klima kipzelt“ – das Interesse der Medien an der Veröffentlichung „Kippelemente im Klimasystem der Erde“ (Lenton et al. 2008) war groß. Zwar ging manche Überschrift an der darin dargelegten Definition von Kippelementen als Bestandteilen des Klimasystems vorbei, doch in der öffentlichen Diskussion um den Klimawandel wurde das Konzept „Kippelement“ mit dem Artikel in den „Proceedings“ der Amerikanischen Nationalen Akademie der Wissenschaften etabliert. Während die Veröffentlichung von der Fachwelt schnell aufgenommen wurde und Impulse für zahlreiche wissenschaftliche Publikationen gab, wurde sie von einigen Medien eher kritisch behandelt.

Kassandrarufo

Als „klimatologisches Politbarometer“ (Frankfurter Allgemeine Zeitung, 13.02.2008) zeuge der Artikel mehr von der „politischen Sensibilität“ der Klimaforscher als von gesichertem Wissen, hieß es; und von „Kassandras“ wurde berichtet (ZEIT Online, 11.02.2008), die konträr zur üblichen wissenschaftlichen Praxis Meinungsumfragen als alarmierende Forschungsergebnisse verkauften. Doch der Artikel enthielt viel mehr als die Ergebnisse einer Befragung von 52 Erdsystemexperten. Kern der Veröffentlichung war die Einführung eines mathematischen Formalismus, der Kippelemente und ihr Verhalten beschreibt. Darüber hinaus wurden die Ergebnisse eines Klima-Workshops und

einer intensiven Literaturrecherche zusammengefasst (siehe Abbildung 1). Bei Risikoanalysen – und darum ging es bei der Auswahl von neun gesellschaftlich besonders relevanten Kippelementen – sind Experten-Umfragen aber auch für sich allein schon ein bewährtes Mittel, Wissen zusammenzuführen, auf dass es in politische Entscheidungsprozesse einfließen kann.

Zentrale Aussage des Artikels ist die Feststellung, dass sich der Klimawandel nicht in allen seinen Ausprägungen langsam und glatt vollziehen muss. Die Erwärmung kann in bestimmten Regionen der Erde noch in diesem Jahrhundert drastische und teilweise unumkehrbare Entwicklungen mit weit reichenden Folgen anstoßen. Viele Fragen zu solchen Kippelementen sind zwar noch offen, aber in der entscheidenden Einschätzung sind sich die Experten einig: Schon kleine weitere Störungen der Prozesse im Klimasystem der Erde können große Auswirkungen auf Mensch und Natur haben. Wegen dieser Risiken und der bestehenden Unsicherheiten müssen Kippelemente dringend weiter erforscht werden – auch eingedenk der Sage, nach der die trojanische Seherin Cassandra mit allen ihren düsteren Weissagungen Recht behalten sollte.

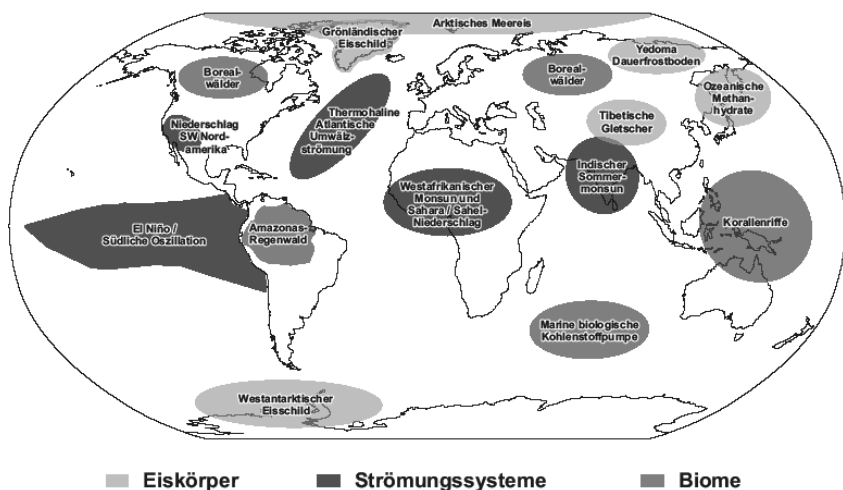


Abb. 1: Kippelemente im Klimasystem der Erde

Die bisher beschriebenen Kippelemente lassen sich drei Gruppen zuordnen: (1) Strömungen in den Ozeanen und der Atmosphäre, (2) Eiskörpern sowie (3) Biomen, Landschaftseinheiten mit einem eigenen Klima und daran angepassten Artengemeinschaften von Pflanzen und Tieren.

Strömungen – Stabilität im Fluss

Die ganzjährig oder saisonal vorherrschenden Muster von Luft- und Meeresströmungen sind relativ stabil, aber nicht unveränderlich. In der Klimageschichte unseres Planeten hat es mehrfach Umbrüche und Phasen der Neuorganisation gegeben. So setzte vor etwa 11 000 und vor 8200 Jahren der Zustrom warmer Wassermassen vom tropischen in den arktischen Atlantik aus oder wurde zumindest deutlich schwächer, was innerhalb weniger Jahre zu einer starken Abkühlung im nordatlantischen Raum führte.

Die so genannte *Thermohaline Atlantische Umwälzströmung* ist das archetypische Kippelement. Die Untersuchung ihrer früheren Unterbrechungen, nachvollziehbar etwa anhand von Sedimentablagerungen, führte zur Frage, ob eine starke weitere Klimaerwärmung den Kreislauf von Meeresströmungen erneut ins Stocken bringen könnte. Aufrechterhalten wird die Zirkulation von der Tiefenwasserbildung im polaren Nordatlantik. Der warme und salzige Nordatlantikstrom kühlt sich auf dem Weg dorthin ab und sein Wasser sinkt aufgrund der damit zunehmenden Dichte in die Tiefe. Strömt mehr Süßwasser ein, aus Flüssen und von abschmelzendem Eis, verringert sich mit der Salzkonzentration die Dichte des Oberflächenwassers. Bei globaler Erwärmung von 3 bis 5 °C könnte der Süßwasserzufluss so stark werden, dass ein Kippunkt überschritten wird und die Tiefenwasserbildung aussetzt. Der Nordatlantikstrom und der damit verbundene Transport von Wärme und Nährstoffen würden unterbrochen. Die „Heizung“ für den Nordatlantikraum würde zurückgefahren und der Meeresspiegel könnte um stellenweise bis zu einem Meter steigen. Die Abkühlung des Meeres im Norden bedeutete zudem eine Erwärmung im Süden, was sich auf das Klima der Südhalbkugel auswirken und tropische Niederschlagsgürtel verschieben könnte.

So wird angenommen, dass ausgeprägte Dürrezeiten in Westafrika mit den vergangenen Abschwächungen der Umwälzströmung zusammenhängen. Dieses Szenario könnte sich wiederholen: Der Wärmestau im tropischen Atlantik mindert die Temperaturdifferenz zwischen Land und Meer. Dadurch kann dieser Antrieb des *Westafrikanischen Monsuns*, eines weiteren Kippelementes, geschwächt werden, sodass die Niederschläge völlig ausbleiben oder in anderen Regionen entstehen. Modellierungen zeigen, dass der Niederschlagsgürtel nach Süden über den Golf von Guinea oder nach Norden in die Sahel-Zone oder bis in die südliche Sahara verschoben werden könnte. Für zum Teil dicht besiedelte Regionen Afrikas ist heute nicht abzusehen, ob

eine Destabilisierung des Monsuns Dürre oder mehr Regen bringen würde.

Monsunsysteme, so auch der *Indische Sommermonsun*, verfügen zudem über eine Eigenschaft, die sie unberechenbar werden lassen kann: einen inneren Rückkopplungsmechanismus. Die über Land einsetzenden Niederschläge kühlen die Landoberfläche, sie setzen in der Atmosphäre aber latente Wärme frei, wenn Wasserdampf zu Regentropfen kondensiert. Je mehr feuchte Luft zum Land transportiert wird und dort abregnet, umso mehr latente Wärme wird freigesetzt und umso mehr feuchte Luft vom Meer wird nachgesogen. Diese Selbstverstärkung, die so genannte Feuchte-Advektions-Rückkopplung, erhält die Temperaturdifferenz zwischen Land und Meer und damit die Zirkulation aufrecht. Der Mechanismus ist allerdings anfällig, etwa für Luftverschmutzung. Schon kleine Störungen können verhindern, dass sich eine stabile Luftzirkulation entwickelt, die regelmäßig Niederschläge bringt. Der Name „Monsun“ wurde vom arabischen Wort „mausim“ für Jahreszeit abgeleitet. Ein chaotisch zwischen regenreichen und extrem regenarmen Phasen wechselnder Monsun würde seinem Namen nicht mehr gerecht und die Anpassungsfähigkeit der in Monsungebieten weit verbreiteten Subsistenzlandwirtschaft überfordern. Die Destabilisierung des Monsuns würde die Ernährungsgrundlagen von vielen Millionen Menschen gefährden.

Die Landwirtschaft in den USA ist besser gerüstet, sich an veränderte Bedingungen anzupassen. Doch im Südwesten des Landes könnten die bereits raren Niederschläge noch deutlich abnehmen. Ursache wäre die Ausdehnung der subtropischen Trockenzone nach Norden, die mit nie dagewesenen Dürren im südwestlichen Nordamerika und dem erhöhten Risiko von Überschwemmungen in den nördlich gelegenen Präriegebieten einhergehen könnte. Dass das Klima in der Region trockener wird, erscheint heute wahrscheinlich. Ob bei dieser Entwicklung des *Niederschlags in Südwest-Nordamerika* ein Kipppunkt überschritten wird, ist dagegen noch unklar.

Als Bestandteile des Klimasystems sind Kippelemente untereinander verbunden. Das Kippen des einen wirkt sich auf die Stabilität eines oder mehrerer anderer aus. Neben der *Thermohalinen Atlantischen Umwälzströmung* kann besonders ein weiteres Kippelement als „Global Player“ betrachtet werden: die Ozean-Atmosphären-Wechselwirkung *El Niño/Südliche Oszillation (ENSO)*. Während eines *El-Niño*-Ereignisses gelangt warmes Wasser an die Oberfläche des tropischen Pazifiks. Als *Südliche Oszillation* wird die Konstellation eines Hoch- und eines Tief-

druckgebietes über Südostasien und über dem südöstlichen Pazifik bezeichnet, die sich in ihrer Ausprägung gegenseitig beeinflussen. Sinkt der Luftdruck über dem südöstlichen Pazifik, steigt er über Südostasien. Das dämpft die Passatwinde entlang des Äquators und das Aufquellen kalten Tiefenwassers im Südpazifik. Auf diese Weise kann die Oszillation *El-Niño*-Ereignisse verstärken.

Computersimulationen zeigen, dass in einer 3 bis 6 °C wärmeren Welt *El-Niño*-Ereignisse stärker ausfallen, aber – entgegen früheren Projektionen – nicht notwendig häufiger eintreten. Bislang wird als unwahrscheinlich angesehen, dass *ENSO* noch in diesem Jahrhundert in einen grundlegend anderen Zustand übergehen könnte. Angesichts der zahlreichen Wechselwirkungen mit natürlichen Lebensräumen, Stoffkreisläufen und auch menschlichen Lebensgrundlagen weltweit muss dies jedoch weiter untersucht werden.

Eiskörper – Stabilität im Gleichgewicht

Wo Eis schwindet, kommt meist einen dunkleren Untergrund zum Vorschein, sei es das felsige Bett eines Gletschers oder das Meer. Diese freigelegte Oberfläche nimmt mehr Sonnenwärme auf, die wiederum den Schwund des verbliebenen Eises beschleunigt. Dieser Mechanismus, die so genannte Eis-Albedo-Rückkopplung, hat das Abschmelzen oder Abfließen und die Neubildung von Meereis und Gletschern weltweit aus dem Gleichgewicht gebracht. Auch der Grönländische und der Westantarktische Eisschild verlieren zurzeit an Masse, auch wenn hier hauptsächlich andere Mechanismen wirken.

Das *Arktische Meereis* dehnt sich am Ende des Winters über rund 15 Mio. Quadratkilometer aus. Bis zum Ende des Sommers schmilzt es auf rund ein Drittel dieser Fläche zusammen. Das Meereis ist ein wichtiger Faktor für das regionale und das globale Klima. Meist schneebedeckt, reflektiert es rund 80 % der Sonnenstrahlung und wirkt damit kühlend. In den letzten Jahrzehnten haben die maximale und, noch deutlicher, die minimale Eisausdehnung stärker abgenommen als nach Modell-Projektionen zu erwarten war. Schon durch die bisherige Erwärmung könnte der Kipppunkt zu einem sommers völlig eisfreien Nordpolarmeer überschritten worden sein. Da sich die Eisdecke in einem kühleren Klima jedoch rasch erholen könnte, ist derzeit noch ungeklärt, ob das *Arktische Meereis* der Definition „Kippelement“ entspricht.

Die großen kontinentalen Eisschilde sind dagegen mit großer Sicherheit Kippelemente. Der größte Eiskörper der Erde, der *Ostantarkti-*

sche Eisschild, ist bislang stabil und legt aufgrund vermehrten Schneefalls sogar Masse zu. Der *Westantarktische Eisschild* verliert dagegen so viel Eis, das die Bilanz für die gesamte Antarktis negativ ausfällt. Große Teile seiner Sohle liegen zudem unterhalb des Meeresspiegels. Würden sie von Meerwasser unterspült, könnte das gesamte Eismassiv instabil werden. Der Kippunkt liegt wahrscheinlich bei einer Erwärmung der Region von 5 bis 8 °C im Sommer. Sollte der *Westantarktische Eisschild* zerrinnen, würde der Meeresspiegel um rund 5 m ansteigen, was allerdings mehrere Jahrhunderte dauern würde.

Der *Grönländische Eisschild* hält genug Wasser für einen Meeresspiegelanstieg um bis zu sieben Meter. In den letzten Jahren hat der Eisverlust durch ins Meer fließende Gletscher und verstärktes Abschmelzen im Sommer stark zugenommen. Der stellenweise 3 km starke Eisschild verliert dadurch an Höhe, was seine Oberfläche in wärmere Luftschichten sinken und noch stärker abschmelzen lässt. Wann genau der Kippunkt zum Zerfall des Eisschildes überschritten ist oder ob dies bereits geschehen ist, lässt sich anhand der heutigen Modelle nicht beurteilen. Selbst bei einer globalen Erwärmung von weniger als 2 °C könnte der Eisschild abschmelzen, bei starker Erwärmung von mehr als 4 °C erwarten das die meisten Experten. Wird die kritische Grenze überschritten, könnte dieses seit 12 000 Jahren stabile Überbleibsel aus der Eiszeit innerhalb von Jahrhunderten schwinden.

Auch auf dem Dach der Welt, dem tibetischen Hochplateau, schwindet die Eisdecke. Tauten die *Tibetischen Gletscher* völlig ab, würden alle großen süd- und ostasiatischen Flüsse im Sommer kein Schmelzwasser mehr führen. Von diesem Wasser hängen aber die Lebensunterhalte von bis zu zwei Milliarden Menschen ab. Die Gletscher werden voraussichtlich umso schneller schwinden, je höher die globale Durchschnittstemperatur steigt. Allerdings wurde bislang kein Kippunkt zum irreversiblen Abschmelzen festgestellt.

Auch der größte Teil der rund 10 Mio. Quadratkilometer arktischen Dauerfrostbodens in Sibirien und Nordamerika weist trotz rapiden saisonalen Auftauens wahrscheinlich nicht die typische Dynamik eines Kippelementes auf. Anders könnte es sich beim so genannten *Yedoma Dauerfrostboden* in Ostsibirien verhalten. Diese etwa 25 m starke Schicht Löß enthält bis zu 500 Mrd. t Kohlenstoff. Vor allem oberhalb des Gefrierpunktes werden die Kohlenstoffverbindungen von Mikroorganismen zersetzt, wodurch zusätzlich Wärme produziert wird. Ab 9 °C Erwärmung in dieser Region könnte dieser Prozess unaufhaltsam werden und über ein Jahrhundert drei Viertel des gespeicherten Koh-

lenstoffs als Kohlendioxid freisetzen – auch wenn die Temperatur nach Beginn dieses Prozesses wieder sinkt.

Ozeanische Methanhydrate sind ein noch größerer Kohlenstoffspeicher; bis zu zwei Billionen Tonnen sind in den Klumpen aus gefrorenem Methan und Eis im Tiefseeboden enthalten. Die Methanhydrate gelten als „träges Kippelement“. Ein globaler Temperaturanstieg von etwa 9 °C könnte – über Jahrtausende – mehr als die Hälfte des Methans freisetzen. Die globale Mitteltemperatur würde dann um weitere 0,5 °C ansteigen, da Methan ein hoch wirksames Treibhausgas ist. Der größte Teil davon würde in der Atmosphäre innerhalb eines Jahrzehnts zu Kohlendioxid oxidiert. Dieses Treibhausgas ist langlebiger, sodass die Erwärmung über Jahrtausende anhalten würde.

Biome – Stabilität durch Anpassung

Wenn es Pflanzen- und Tierarten in einem Gebiet zu warm wird oder zu trocken, wenn sich ihre ökologische Nische aufgrund klimatischer Änderungen schließt, werden sie sich dort nicht halten können. Einige Arten sind gut dafür gerüstet auszuweichen, zum Beispiel polwärts oder in größere Höhenlagen. Arten aus Gebirgs- oder Polarlebensräumen können das nicht. Ohnehin sind geeignete Lebensräume in der heute zum größten Teil vom Menschen beanspruchten Welt rar. Der Klimawandel könnte ganze Landstriche verändern, indem er Biome, ihr typisches Klima und die daran angepassten Artengemeinschaften verschwinden lässt.

Der *Amazonas-Regenwald* ist als das größte tropische Urwaldgebiet der Welt eine bedeutende Kohlenstoffsенке, die der Atmosphäre effektiv Kohlendioxid entzieht. Von einer Dürre im Jahr 2005 hat sich der betroffene Regenwald im Süden und Westen des Amazonasbeckens zwar erholt; es zeigte sich aber, dass der Wald unter Trockenstress zu einer Kohlendioxidquelle wird. Die globale Erwärmung könnte dazu führen, dass ausgeprägte Trockenzeiten künftig die Regel werden. Noch in diesem Jahrhundert könnten bis zu 70 % des Regenwaldes einer Busch- und Graslandschaft oder an trockenere Bedingungen angepasstem saisonalen Wald weichen. Da Regenwald über die Wasserspeicherung und -abgabe an die Atmosphäre für hohe Luftfeuchtigkeit und Niederschläge sorgt, könnte der Waldrückgang, einmal begonnen, selbstverstärkend werden. Die massiven Schädigungen durch Holzeinschlag, häufigere Feuer und Schädlinge beschleunigten diesen Prozess mit Sicherheit noch.

Busch- und Graslandschaften könnten auch die Wälder im hohen Norden verdrängen. Das Wachstum der *Borealwälder* wird vom Stoffwechsel der Bäume, von Frost und Bränden bestimmt. Bei einer globalen Erwärmung um 3 bis 5 °C könnten in 50 Jahren große Flächen der Wälder aufgrund größerer Trockenheit und Hitze im Sommer und häufigerem Schädlingsbefall absterben. Da im Winter aber voraussichtlich weiterhin häufig Frost herrschen wird, werden die Verluste nicht durch Baumarten aus gemäßigten Breiten ausgeglichen.

Korallenriffe sind artenreiche Lebensräume, die empfindlich schon auf geringe Erwärmung reagieren. Die Korallenpolypen bleichen aus, indem sie die in ihnen lebenden Algen abgeben, und sterben ab oder erholen sich nur sehr langsam. Korallen werden aber auch direkt durch den Anstieg der Kohlendioxid-Konzentration geschädigt. Mit Wasser bildet das Treibhausgas Kohlensäure, die das Kalkskelett der Korallen angreift. Darunter leiden besonders Kaltwasserkorallen, die in bis zu 3000 m Tiefe wachsen. Möglicherweise sind auch große Kaltwasser- oder tropische Korallenriffe Kippelemente – dies muss aber noch weiter erforscht werden.

Die Weltmeere nehmen zurzeit jährlich rund 2 Mrd. t Kohlenstoff auf. Ein großer Teil davon wird in Form von Kohlendioxid von Algen zum Wachstum genutzt und sinkt nach deren Absterben in die Tiefsee. Die Funktion dieser so genannten *marinen biologischen Kohlenstoffpumpe* wird durch Erwärmung und Versauerung des Wassers sowie häufiger auftretende Sauerstoffarmut eingeschränkt. Weiterhin zunehmende Emissionen von Treibhausgasen könnten die Stoffkreisläufe von Kohlenstoff und Nährstoffen in den oberflächennahen Wasserschichten grundlegend verändern und ganze marine Ökosysteme schädigen. Nimmt die Fähigkeit der Ozeane ab, Kohlendioxid zu absorbieren, würde die atmosphärische Konzentration des Treibhausgases schneller ansteigen und die Versauerung der Ozeane sowie die Erwärmung der Atmosphäre beschleunigen. Ob die *marine biologische Kohlenstoffpumpe* einer echten Kipp-Dynamik unterliegt, ist jedoch noch offen.

Kassandras Fluch

Kippelemente haben das Potenzial, die Umwelt grundlegend zu verändern, möglicherweise über die Anpassungsmöglichkeiten der Menschen in den betroffenen Regionen hinaus. Die Herausforderung für die Forschung besteht darin, Warnzeichen zu erkennen, die dem Erreichen eines Kipppunktes vorausgehen. Dazu können Datensätze über das Klima früherer Zeiten herangezogen werden, doch die sind nur

begrenzt verfügbar. Eine nahezu universelle Eigenschaft komplexer Systeme vor dem Erreichen eines Kipppunktes ist die Verlangsamung seiner Reaktion auf weitere Störungen. In Messungen folgen dann immer häufiger immer ähnlichere Werte aufeinander. Dies konnte sowohl in Paläo-Klimadaten als auch in Modellen gezeigt werden. Die theoretische Grundlage für ein Frühwarnsystem ist somit gegeben. Es weiter zu entwickeln, könnte uns in die Lage versetzen, zumindest Vorkehrungen zu treffen, wenn das Überschreiten eines Kipppunktes unvermeidbar wird. Massenmigrationen wären eine mögliche Reaktion der Bevölkerung in betroffenen Regionen, was zu politischen Konflikten führen könnte. Es ist daher dringend erforderlich, auch Kippelemente im Gesellschaftssystem zu erforschen, die die soziale Dynamik bestimmen. Fraglich ist aber, ob die Gesellschaft angemessen auf entsprechende Warnungen reagieren würde. Die Sagenfigur Cassandra verfügte über die göttliche Gabe der Vorsehung, doch war sie dazu verflucht, dass man ihr nicht glauben sollte. Wir kennen das Ende der Sage: Troja wird zerstört.

Bislang ist es eher unwahrscheinlich, dass umfassende Anpassungs- und Vermeidungsmaßnahmen auf die Warnung hin ergriffen würden, dass ein Kipppunkt überschritten werden könnte. Die Verhandlungen über ein globales Klimaabkommen sind in Kopenhagen mit einem Minimalkompromiss vorläufig zum Stillstand gekommen. Die globale Erwärmung zu begrenzen ist jedoch die wichtigste Strategie, das Risiko zu minimieren, das von Kippelementen ausgeht. Die politisch diskutierte 2°C-Leitplanke einzuhalten und den Ausstoß von Treibhausgasen noch in diesem Jahrhundert auf praktisch Null zu verringern, wird wahrscheinlich nicht ausreichen, sämtliche Kippelemente zu stabilisieren. Doch erscheint dies weit sicherer als das Leben in einer drei, vier oder mehr Grad Celsius wärmeren Welt.

Literatur

- Kriegler, E., J. W. Hall, H. Held, R. Dawson & H. J. Schellnhuber: Imprecise probability assessment of tipping points in the climate system. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106, 2009, S. 5041–5046
- Lenton, T. M., H. Held, E. Kriegler, J. Hall, W. Lucht, S. Rahmstorf & H. J. Schellnhuber: Tipping elements in the Earth's climate system. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105, 2008, S. 1786–1793
- Richardson, K., W. Steffen, D. Liverman, T. Barker, F. Jotzo, D. Kammen, R. Leemans, T. Lenton, M. Munasinghe, B. Osman-Elasha, H. J. Schellnhuber, N. Stern, C. Vogel & O. Wæver: Tipping elements: Jokers in the pack, in: *Climate Change: Global Risks, Challenges and Decisions*, Chapter 7, Cambridge 2010
- Schellnhuber, H. J.: Tipping elements in the Earth system. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106, 2009, S. 20561–20563

Kartierung der Argumente zum Geoengineering

Die Debatte um Geoengineering bzw. Climate Engineering (CE) nimmt Fahrt auf. Vor kurzem wurde in Asilomar eine große Konferenz abgehalten. Deutsche Universitäten bieten Sommerkurse an. Die Medien greifen das Thema auf. Es sind pikanterweise überwiegend die Kreise der Kritiker einer Klimapolitik, in deren Mittelpunkt die Verringerung der Treibhausgasemissionen steht, die CE propagieren. Dies geschieht mit der Unterstützung vieler *think tanks* und renommierter Universitäten. Wissenschaftspolitische Naivität wäre angesichts des sich etablierenden Akteursnetzwerks also verfehlt. In jedem Falle ist es zu begrüßen, dass sich in Deutschland eine Verantwortungsinitiative aus Wissenschaftlern unterschiedlicher Disziplinen gebildet hat, die bislang zu mehreren DFG-Rundgesprächen geführt hat.

Wenn ich mit Studenten, Kollegen, Nachbarn und Bekannten über Climate Engineering spreche, ernte ich immer sehr ähnliche intuitive Reaktionen. Sie reichen von der Verwunderung darüber, dass „so etwas überhaupt diskutiert wird“ über eine politisch gefärbte Empörung darüber, dass ausgerechnet in den USA, die mit guten Gründen als größter klimapolitischer „Schurkenstaat“ bezeichnet werden können, diese Option favorisiert wird, bis hin zu fassungslosem Entsetzen über die Anmaßungen der Machbarkeit. Die hierzulande verbreiteten Intuitionen sprechen insofern die klare Sprache von Nein-Stellungnahmen. Ethisch betrachtet, sind moralische Intuitionen so etwas wie die Rohmaterialien praktischer Diskurse, die gewiss keine moralische Sicherheit verbürgen, aber auch nicht einfach als belanglos abgetan werden können. Dies sehen auch Befürworter von CE-Forschung ähnlich: „It is a healthy sign that a common first response to geoengineering is revulsive“ (Keith, Parson & Morgan 2010, S. 427).

In naturwissenschaftlichen Kreisen werden immer ein Wissensdefizit und damit ein Forschungsdesiderat geltend gemacht. Ein moralisches oder politisches Urteil bedürfe einer notwendigen, wenngleich nicht hinreichenden Voraussetzung belastbarer wissenschaftlicher Informationen über Möglichkeiten, Konsequenzen und, nicht zuletzt, Risiken des CE. Auch wird unter Wissenschaftlern mehrheitlich anerkannt, dass großmaßstäbliche Feldversuche etwa mit Sulfatinjektionen in der Stratosphäre nicht durch das Prinzip der Forschungsfreiheit ab-

gedeckt sind, da es sich um Handlungen in und an der Realität handelt. Der Habitus der hiesigen Naturwissenschaftler ist eher vorsichtsorientiert. Auch die Deklaration, die am Ende der Asilomar-Konferenz verabschiedet wurde, betont die Prinzipien von Verantwortung, Transparenz und Partizipation (Committee 2010).

In ökonomischen und sozialwissenschaftlichen Kreisen neigt man dazu, CE-Optionen anhand der üblichen Entscheidungsschemata zu beurteilen, also anhand (1) von Kosten-Nutzen-Analysen oder (2) anhand einer „rational-choice“-Theorie in Verbindung mit einer Portfolio-Konzeption aller Möglichkeiten, den Klimawandel und seine Auswirkungen zu begrenzen. Von einigen Autoren wird nun sogar (3) vorgeschlagen, die Beurteilung von CE dem Ingenieursverstand zu überantworten, der nach nicht näher benannten Kriterien ein „intelligentes“ von einem „dummen“ CE unterscheiden können soll (so Hauhs & Lange in diesem Band). Das Problem einer möglichen Transformation ethischer in technologische Fragen ist in der Technikethik seit Jahrzehnten diskutiert. Ich glaube, dass diese Transformation von ethischen Fragen in technische Normen für ein interaktives Kontrollproblem immer auf eine trübe Mischung aus krypto-normativen und pseudo-technologischen Kriterien hinauslaufen muss. Ob dies stimmt, wird man sehen, wenn es zu einer solchen Sammlung kommt, die von Hauhs und Lange angekündigt wird, aber noch aussteht. In dem für die kriteriologische Debatte maßgeblichen Bericht der britischen Royal Society werden „harte“ von „weichen“ Kriterien der Bewertung unterschieden (Royal Society 2009). Hierzu habe ich an anderem Ort Stellung bezogen und gefordert, den ethischen Kriterien größere Bedeutung beizumessen (Ott 2010, S. 61).

Es ist angesichts der Größenordnung der Herausforderung, der eingangs genannten Intuitionen und der möglichen langfristigen Auswirkungen des CE keineswegs klar, welche der gängigen Entscheidungsschemata zur Beurteilung herangezogen werden sollen. Es geht also im ersten Schritt nicht um die Details einzelner Schemata (wie die Wahl der Diskontrate oder die Monetarisierung ökologischer Schäden), sondern um die Wahl der geeigneten Schemata selbst. Mit Immanuel Kant kann man derartige grundsätzliche Fragen mit Hilfe der Unterscheidung von Verstand und Vernunft näher fassen: Der Verstand entwickelt vielfältige Maximen des Handelns und Schemata der Beurteilung, während die Vernunft diese Maximen und Schemata kritisch reflektieren können muss. Unterbleibt solche Reflexion, können die Leistungen des Verstandes ethisch in die Irre führen.

Freilich bedürfen wir eines Denkrahmens für die umfassende diskursive Beurteilung von CE-Optionen. Die Schemata des technischen und ökonomischen Verstandes müssen durch ein, grob gesagt, diskursethisches Schema ersetzt werden. Dieses muss in der Wirklichkeit des Diskurses seine Überlegenheit gegenüber ökonomischen und technologischen Schemata unter Beweis stellen. Ein solcher diskursanalytischer Denkrahmen wird im ersten Teil dieses Aufsatzes skizziert. Im zweiten Teil werden Argumentationsmuster versammelt, die für und gegen eine bestimmte Einsatzvariante von CE sprechen. Im dritten Teil wird dann eine vorläufige Stellungnahme gewagt.

Diskursanalytischer Denkrahmen

Ein analytisches Schema einzelner Komponenten von CE-Optionen umfasst eine Reihe von Unterscheidungen. Die *erste* Unterscheidung verortet CE in der übergreifenden Problematik des Klimawandels. Maßnahmen, den Klimawandel und seine Folgen zu begrenzen, lassen sich in drei Kategorien einteilen: a) Emissionsvermeidung (*mitigation*), b) Anpassung an den Klimawandel (*adaptation*) und c) Klimamanipulation (*climate engineering* – CE). Diese Dreiecksbeziehung verlangt es, die einzelnen Teilrelationen näher zu bestimmen. Hierzu werden in der Literatur häufig Vokabeln wie „komplementär“, „einander nicht ausschließend“, „unterstützend“ verwendet. Allerdings ist eine rein logische und statische Betrachtung dieser Teilrelationen unzureichend. Es kommt vielmehr entscheidend darauf an, die politische Dynamik dieses Beziehungsgefüges zu konzipieren. So könnte CE *verbaliter* als allenfalls kurzfristige Ergänzung zu *mitigation* bestimmt werden, während CE sich *realiter* zur Alternative entwickelt. Die Bestimmung der Teilrelationen ist sehr wichtig, wenn es darum geht, Bedingungen zu formulieren, unter denen CE erlaubt sein könnte.

Die *zweite* Unterscheidung differenziert zwischen Typen des CE. Hier hat sich die Unterscheidung zwischen *Carbon Dioxide Removal* (CDR) und *Solar Radiation Management* (SRM) eingebürgert (siehe hierzu den Beitrag von Rayner in diesem Band). Beide Typen lassen sich weiter nach Unterformen differenzieren (hierzu Rayner in diesem Band). Alle Subtypen von CE können näher beschrieben werden. Als *Beschreibungsfolien* bieten sich Machbarkeit, Wirksamkeit, d. h. Effektivität („Klimapotenzial“), Forschungsprofil, Risiken, Ungewissheiten, involviertes Akteursnetzwerk und dergleichen an. Beschreibungen sollen (möglichst werturteilsfrei) verdeutlichen, womit wir es jeweils zu tun haben. Sie sollten natürlich auch Wissensdefizite identifizieren.

CDR stehe ich in Forschung und Anwendung aufgeschlossen gegenüber. Einzelne Unterformen wie etwa Aufforstung, Moorschutz, Schutz des Kohlenstoffs in Böden etc. weisen viele Querverbindungen zu kluger Anpassung und zum Schutz und der nachhaltigen Nutzung biologischer Vielfalt auf. Forschungen zu derartigen CDR-Optionen sollten verstärkt gefördert werden. Es ist bezeichnend, dass CDR zwar immer genannt, aber nur selten propagiert wird. Zumeist wird gesagt, CDR wirke nur langsam. Das ist richtig, zeigt aber, dass eine Kombination aus strikter Vermeidung, kluger und gerechter Anpassung sowie ergänzendem, naturschutzorientiertem Maßnahmen eine kohärente und konsistente globale Strategie darstellt (Ott 2009).

Eine bezeichnende Aussage eines SRM-Protagonisten zu CDR möchte ich hier zitieren: „Most people probably don't think of planting trees as geoengineering. I doubt whether most of you would have come if this program were on afforestation“ (Schelling 1996, S. 305). Der Ausdruck „program“ bezieht sich auf die Tagung, anlässlich derer Schelling seine Vorschläge zu SRM unterbreitete. Bezeichnend ist dies deshalb, weil er offenbar an einen stillen Hintergrundkonsens des Publikums appellieren konnte, dass es bei CE letztlich nur um SRM gehe.

SRM kann differenziert werden nach a) weltraumgestützten Reflektoren, b) technischer Erzeugung von Wolken und c) Einbringen großer Mengen von Sulfaten in die Stratosphäre. Es dürfte weitgehend Konsens bestehen, dass die Beschreibungen der Sulfat-Option ein Eigenschaftsprofil ergeben, aufgrund dessen man die These vertreten kann, dass diese Option die eigentliche ethische Versuchung darstellt (Ott 2010). Im Folgenden konzentriere ich mich daher auf diese Option fokussiert. Die Debatte um CE im Allgemeinen und über CDR im Besonderen könnte dadurch insgesamt gewinnen, wenn man sich zunächst die größtmögliche Klarheit über die Sulfat-Option verschafft hätte (siehe hierzu den Beitrag von Crutzen in diesem Band).

Die *dritte* Unterscheidung betrifft das Verhältnis von Forschung und Einsatz. Hier ist zwischen theoretischer Forschung (Modellierung), Experimenten unter Laborbedingungen, Freilandversuchen und dem wirklichen Einsatz etwa der Sulfat-Option zu unterscheiden. Besonders umstritten sind großmaßstäbliche Feldversuche mit Sulfaten in der Atmosphäre. Derartige Versuche erscheinen erforderlich, wenn man belastbare Aussagen über die Klimawirksamkeit treffen möchte. Sie sind aber bereits direkte Eingriffe mit realen Konsequenzen und stehen daher unter wissenschaftsethischen Prinzipien wie dem einer