

Herausgeber

Prof. Dr. Michael Brzoska,
Institut für Friedensforschung
und Sicherheitspolitik an der
Universität Hamburg (IFSH)

Dr. Walter E. Feichtinger,
Landesverteidigungsakademie,
Institut für Friedenssicherung
und Konfliktmanagement,
Wien

Dr. Volker Franke, Kennesaw
State University, Kennesaw,
Georgia (USA)

Prof. Dr. Hans J. Giessmann,
Berghof Conflict Research,
Berlin

Prof. Dr. Heiner Hänggi,
Genfer Zentrum für die
demokratische Kontrolle der
Streitkräfte (DCAF), Genf

Dr. Sabine Jaberg, Führungs-
akademie der Bundeswehr,
Hamburg

Dr. Axel Krohn, Führungs-
akademie der Bundeswehr,
Hamburg

Dr. Patricia Schneider, IFSH

Schriftleitung

Prof. Dr. Michael Brzoska

Redaktion

Dr. Martin Kahl (V.i.S.d.P.), IFSH

Dr. Regina Heller
Dr. Sybille Reinke de Buitrago
Susanne Bund

Beirat

Prof. Dr. Alyson J.K. Bailes,
University of Iceland, Reykjavik

Dr. Detlef Bald, München

Prof. Dr. Susanne Buckley-
Zistel, Universität Marburg

Alain Deletroz, Vizepräsident
International Crisis Group

Prof. Dr. Pál Dunay, Genfer
Zentrum für Sicherheitspolitik
(GCSP)

Prof. Dr. Susanne Feske,
Universität Münster

Prof. Dr. Heinz Gärtner,
Universität Wien

Prof. Dr. Laurent Götschel,
Universität Basel

Prof. Dr. Anton Grizold,
Universität Ljubljana

PD Dr. Hans-Joachim Heintze,
Ruhr-Universität Bochum

Prof. Dr. Charles A. Kup-
chan, Georgetown University,
Washington, D.C.

Dr. Jocelyn Mawdsley,
Newcastle University

Dr. Anja Seibert-Fohr,
MPI Heidelberg

Dr. Marianne Wade,
MPI Freiburg

THE MENSCHWERPUNKT

Geoengineering – Möglichkeiten und Risiken

Michael Brzoska, P. Michael Link und Götz Neuneck*

Abstract: The international debate on deliberate large-scale interventions to counter climate change is gaining prominence. Two types of measures targeting different basic features of the climate system have been suggested. One is solar radiation management; the other is the removal of carbon from the atmosphere. Particular approaches have been proposed for both types of measures. Recent research on these approaches shows large gaps in knowledge regarding scientific and technical issues, but even more on consequences for the environment and human societies. This article provides an overview of the main issues related to geoengineering.

Keywords: Geoengineering, earth system, climate change
Geoengineering, Erdsystem, Klimawandel

1. Einführung

Gezielte, von Menschen gemachte Veränderungen von Wetter und Klima – d.h. des durchschnittlichen Wetters über längere Zeiträume hinweg –, faszinieren insbesondere Wissenschaftler bereits seit Langem. Konzeptionelle Ansätze und praktische Anwendungen zu diesem Themenkomplex existieren schon seit Jahrzehnten, wie Jim Fleming in seinem Beitrag in diesem Heft zeigt, doch

hat die Diskussion über den Klimawandel derartigen Ideen und Ansätzen in den letzten zehn Jahren eine ganz neue Dimension verliehen. Insbesondere wird darüber nachgedacht, wie durch „Geoengineering“, also durch zielgerichtete Eingriffe in das Klimasystem, die negativen Auswirkungen des Klimawandels zumindest verringert werden könnten. Denn mehr und mehr setzt sich die Erkenntnis durch, dass die Wahrscheinlichkeit starker Veränderungen des Klimas steigt. Das Zeitfenster für eine Eindämmung des Klimawandels auf ein Maß, dessen Folgen noch gut handhabbar wären, wird immer kleiner – selbst wenn eine massive Verringerung des Ausstoßes von Treibhausgasen erfolgen sollte. Damit steigt nach Meinung der Befürworter des Geoengineering die Attraktivität von Maßnahmen, die den Klimawandel auch ohne die Reduzierung der Produktion von Treibhausgasen begrenzen würden.

* Prof. Dr. Michael Brzoska ist Direktor des Instituts für Friedensforschung und Sicherheitspolitik an der Universität Hamburg (IFSH) und Principal Investigator am KlimaCampus Hamburg; Dr. P. Michael Link ist wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Forschungsgruppe „Climate Change and Security“ am KlimaCampus Hamburg; Prof. Dr. Götz Neuneck ist Leiter der Interdisziplinären Forschungsgruppe Abrüstung, Rüstungskontrolle und Risikotechnologien am IFSH.

Zahlreiche solcher Maßnahmen sind in der jüngeren Vergangenheit vorgeschlagen worden. Die wichtigsten werden weiter unten im Detail diskutiert (Tabellen 1 und 2). Einige dieser Maßnahmen, wie etwa die Aufforstung von Wäldern, kommen bereits im Rahmen von Strategien zur Vermeidung der Produktion von CO₂ zur Anwendung; andere, wie z.B. die Nutzung von Spiegeln im Weltraum zur Ablenkung oder Bündelung von Sonnenstrahlen, sind hingegen noch Zukunftsmusik.

Damit derartige Eingriffe klimarelevant werden, müssen sie in großem Maßstab durchgeführt werden. Über die technische Machbarkeit einzelner Vorschläge für Geoengineering sowie ihre tatsächlichen Kosten und Wirkungen wird heftig gestritten. Für viele der propagierten Methoden liegen bisher nur begrenzt gesicherte Erkenntnisse vor. Ähnlich wie beim Klimawandel, der ungewollt durch die Produktion von Treibhausgasen entsteht, sind auch mit Geoengineering (inzwischen oft auch als „Climate Engineering“ bezeichnet) massive Veränderungen der Umwelt und damit auch der Lebensbedingungen von Menschen und Gesellschaften verbunden.

Im Folgenden werden wahrscheinliche und vermutete Wirkungen diskutiert. Der Schwerpunkt liegt dabei auf lokalen, regionalen und globalen Gefahren für Frieden und Sicherheit. Geoengineering birgt, über technische und Risiken für die Umwelt hinaus, auch Risiken für das friedliche Zusammenleben

von Menschen, gesellschaftlichen Gruppen und Staaten. Daran schließt sich eine Diskussion derjenigen offenen Fragen an, die mit Geoengineering in der näheren Zukunft verbunden sind.

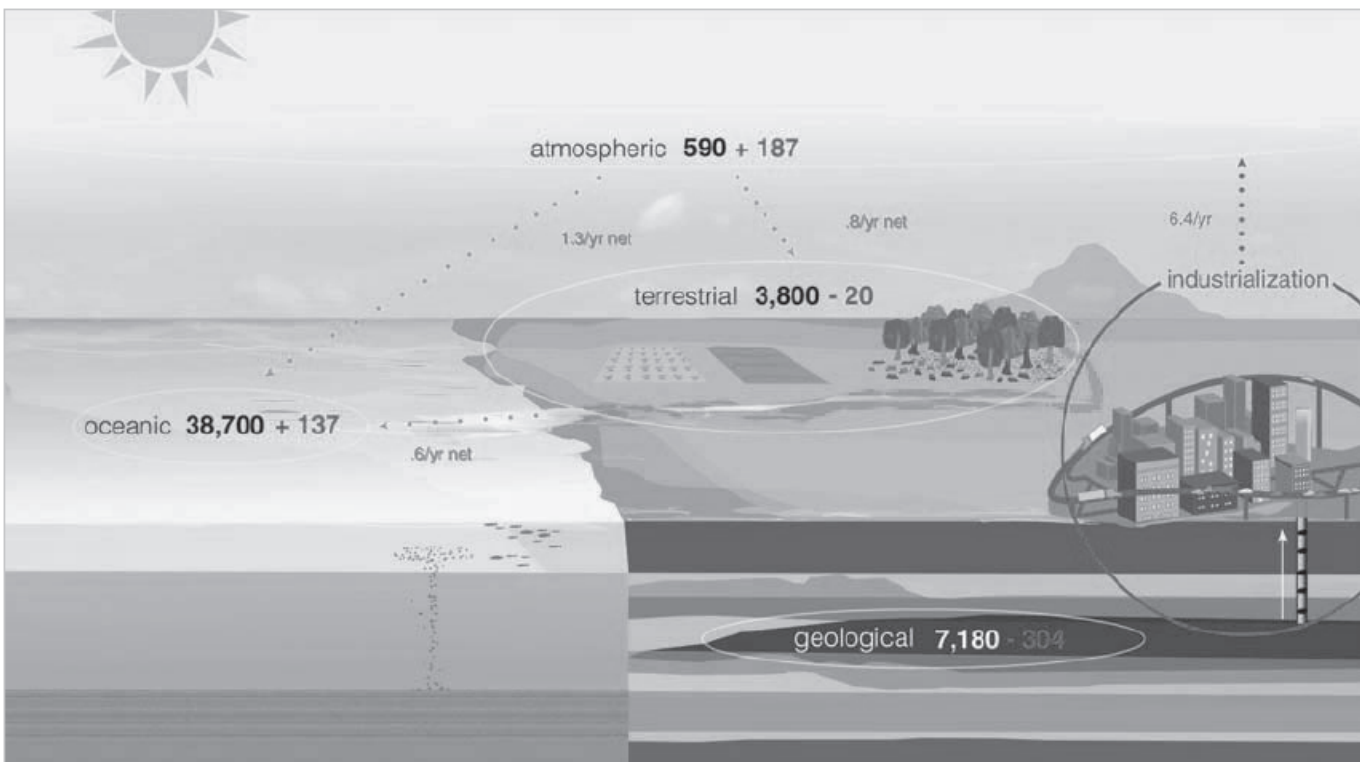
2. Ursachen und Dynamiken des Klimawandels

Abbildung 1 illustriert in vereinfachter Form die Veränderungen der globalen Bestände an Kohlenstoff von Beginn der Industrialisierung bis heute. Die Verbrennung fossiler Brennstoffe, vor allem von Öl und Gas (304 Gigatonnen¹ Kohlenstoff), hat bereits zu einem starken Anstieg des Kohlenstoffgehalts in der Atmosphäre (+187 Gigatonnen Kohlenstoff) und den Weltmeeren (+134 Gigatonnen Kohlenstoff) geführt, vor allem in Form von Kohlendioxid (CO₂). Die Anreicherung der Atmosphäre mit CO₂ und anderen Klimagasen verändert die Art und Weise, mit der Wärmeenergie nach Abstrahlung von der Erdoberfläche in der Erdatmosphäre gehalten wird.

Abbildung 2 liefert eine schematische Darstellung des durchschnittlichen Energiehaushalts der Erdatmosphäre. Die durchschnittliche globale Sonneneinstrahlung beträgt etwa 342 Watt

¹ 1 Gigatonne entspricht 1 Milliarde Tonnen.

Abbildung 1: Vereinfachte Darstellung der globalen Kohlenstoffbestände und -flüsse



Anmerkung: Alle Zahlenangaben in Gigatonnen Kohlenstoff. Die Zahlenangaben in Fettschrift beziehen sich auf die vorindustriellen Bestände. Die nachfolgenden Zahlen geben die kumulierten Veränderungen im industriellen Zeitalter bis heute an. Die kleingedruckten Zahlen sind Angaben für den gegenwärtigen jährlichen Kohlenstofffluss im Kohlenstoffkreislauf in Gigatonnen Kohlenstoff. Die stärkste Veränderung der einzelnen Bestände verursacht die Industrie mit 6,4 Gigatonnen pro Jahr. Quelle: GAO 2011, S. 4.

pro Quadratmeter (W/m^2). Im dargestellten Gleichgewichtszustand nehmen Erdoberfläche ($492 W/m^2$) und Atmosphäre und Wolken ($519 W/m^2$) genau so viel Energie auf, wie sie anschließend wieder abgeben. Es findet keine Temperaturveränderung statt. Treibhausgase vermindern die Abstrahlung von Energie ins All und führen dadurch zu einer Erwärmung der Erdatmosphäre. Die Produktion von CO_2 durch menschliche Aktivität erreichte im Jahre 2011 einen Rekord von etwa 34 Gigatonnen.² Seit Beginn der Industrialisierung hat sich die Konzentration von CO_2 in der Erdatmosphäre von ca 280 ppm (parts per million, Teile pro Million) auf ca 390 ppm erhöht. Gleichzeitig ist die Abstrahlung von Energie ins Weltall um ungefähr 1,6 Watt pro Quadratmeter gesunken.³

Soll eine weitere Erwärmung der Erdatmosphäre verhindert werden, bietet sich daher als logische Maßnahme die drastische Verminderung der Erzeugung von Treibhausgasen, insbesondere der Umwandlung weiterer großer Mengen fossilen Kohlenstoffs in CO_2 („Mitigation“), an. Das ist auch das Ziel gegenwärtiger Klimapolitik, welches allerdings bisher bestenfalls in Ansätzen erreicht wurde.

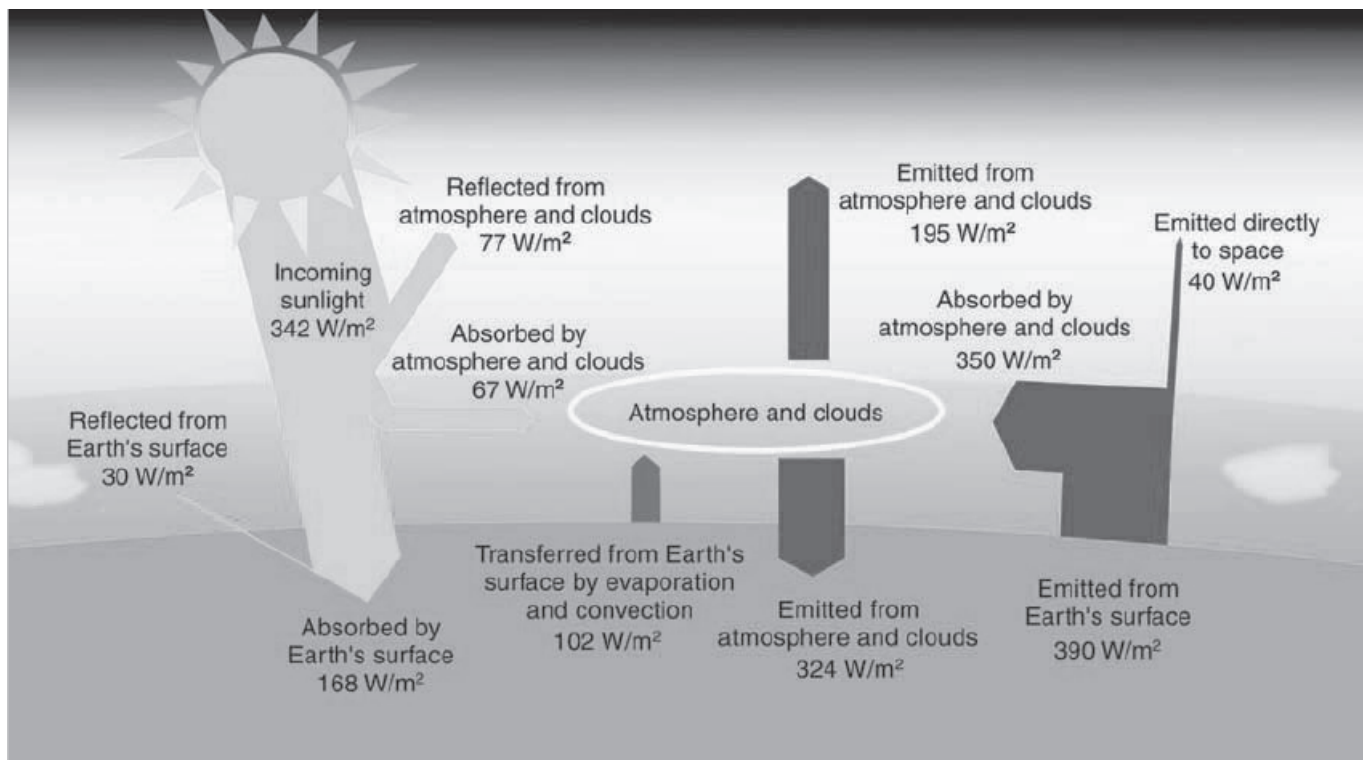
² http://ec.europa.eu/dgs/jrc/downloads/jrc_20120618_newsrelease_trends_in_global_co2_emissions.pdf.

³ <http://web.mit.edu/newsoffice/2010/explained-radforce-0309.html>.

3. Ansätze und Methoden des Geoengineerings

Statt den Ausstoß von Treibhausgasen zu reduzieren, können im Prinzip auch andere Verfahren angewendet werden, um der globalen Erwärmung entgegenzuwirken. Diese lassen sich grob in zwei Gruppen unterteilen: Methoden zur Senkung der CO_2 -Konzentration in der Atmosphäre (*Carbon Dioxide Removal*, CDR) vermeiden, dass einmal erzeugtes CO_2 zur Aufheizung der Atmosphäre beiträgt, indem es direkt oder in Form anderer chemischer Verbindungen von Kohlenstoff in Materialien, im Boden, im Wasser oder in Biomasse gespeichert wird. Idealerweise könnte so die Menge an CO_2 in der Atmosphäre gesteuert und z.B. bei 390 ppm gehalten werden. CDR-Methoden sind im Vergleich zu Mitigation sehr kostenintensiv. Ein Vorteil gegenüber anderen, weiter unten diskutierten Methoden besteht allerdings darin, dass die CO_2 -Konzentration in der Atmosphäre relativ leicht gemessen und daher z.B. auf den Stand vor der Industrialisierung zurückgeführt werden kann. Allerdings reagiert das Energiesystem der Erde sehr langsam auf die Veränderung der CO_2 -Konzentration, sodass sich die gewünschten Wirkungen auf die globale Durchschnittstemperatur erst Jahre oder Jahrzehnte nach Beginn der CDR-Maßnahmen einstellen würden. In der einschlägigen Literatur werden die folgenden Methoden als potenziell am effektivsten beschrieben (Tabelle 1):

Abbildung 2: Durchschnittlicher globaler Energiehaushalt der Erdatmosphäre, vereinfachte Darstellung



Anmerkung: Alle Zahlenangaben in Watt pro Quadratmeter (W/m^2). Der größte Teil der Sonneneinstrahlung wird in der Atmosphäre und von der Erdoberfläche absorbiert. Die Zusammensetzung der Erdatmosphäre (einschließlich der Wolkenbildung) verändert die Menge an Wärmeenergie, die von ihr absorbiert wird. Treibhausgase führen zu einer Erhöhung der Sonnenenergie, die in der Erdatmosphäre eingefangen wird.

- **CO₂ Abscheidung und Lagerung (CCS, Carbon Capture and Storage)** ist die wohl bekannteste und technisch trotz vieler Unwägbarkeiten am weitesten entwickelte CDR-Methode. CO₂ wird aus der Luft abgetrennt und in unterirdische Lager gedrückt. Die CCS-Technologie kann in Verbindung mit der Erzeugung von Energie aus Biomasse theoretisch einen unbegrenzt hohen Beitrag zur Verminderung der CO₂-Konzentration in der Atmosphäre leisten. Allerdings sind ihre Kosten im Vergleich zu Mitigation hoch. Ein weiteres Problem besteht darin, die Lager erdbebensicher zu machen und so abzudichten, dass das CO₂ nicht wieder in die Atmosphäre gelangen oder das Grundwasser verunreinigen kann. Zudem muss die Akzeptanz der Bevölkerung, die über oder in unmittelbarer Nähe von CO₂-Lagern wohnt, gegeben sein. Vehemente Proteste von Anwohnern von CCS-Testgebieten haben in Deutschland de facto zur Beendigung der weiteren Erforschung und Erprobung der CCS-Technologie geführt.
- **Ozeandüngung durch Nährstoffe.** Das Einbringen von Eisen, aber auch anderen knappen Nährstoffen wie Phosphor oder Stickstoff, fördert das Wachstum von Mikroorganismen (Phytoplankton), die wiederum durch Photosynthese CO₂ binden. Wenn dies in großem Maßstab geschähe, könnten theoretisch beträchtliche Mengen an CO₂ im Meer gebunden werden. Allerdings würde dadurch die Biologie und Chemie der Ozeane in erheblichem Maße beeinflusst, möglicherweise wiederum mit Folgen für die Bindung von CO₂ im Meer. Ein positiver Nebeneffekt könnte in der Vermehrung von Fischbeständen und der damit verbundenen Erhöhung von Fangmengen bestehen. Eine negative Folge wäre die mögliche Verminderung der Biodiversität und die daraus resultierende Gefährdung der Meeresökologie. Nach einer Reihe von kleinskaligen Experimenten wurde 2008 im Rahmen der *Internationalen Konvention zur Biodiversität*

die Durchführung von Experimenten zur Meeresdüngung außerhalb von Küstengewässern solange verboten, bis deren Auswirkungen besser geklärt sind (UNESCO 2010).

- **Aufforstung.** Wälder sind wichtige Kohlenstoffsinken. Ihre systematische Rodung in den letzten Jahrzehnten hat zur Erhöhung der Konzentration von CO₂ in der Atmosphäre beigetragen. Insofern könnten aktive Bemühungen um eine Vermehrung der Waldflächen in großem Maßstab, ebenso wie eine bessere Nutzung vorhandener Flächen, einen wichtigen Beitrag zur Begrenzung des Klimawandels leisten, da so CO₂ auf natürliche Weise gebunden würde. Entscheidend für den Erfolg einer solchen Maßnahme wäre allerdings, wie die Flächen vorher genutzt wurden und was mit der erzeugten Biomasse (und dem darin gebundenen CO₂) nach dem Absterben der Pflanzen geschieht. Andererseits kann eine für die CO₂-Bindung optimierte Flächennutzung in großem Maßstab erhebliche negative Nebenwirkungen haben, etwa auf die Nahrungsmittelproduktion oder Biodiversität.
- **Biokohle.** Biokohle oder Pflanzenkohle wird durch Verbrennung unter Luftabschluss (Verkohlung) aus rein pflanzlichen Ausgangsstoffen hergestellt. Biokohle besteht überwiegend aus reinem Kohlenstoff und wird durch Mikroorganismen nur sehr langsam abgebaut – in landwirtschaftliche Böden eingearbeitet bleiben etwa 80 Prozent für mehr als 1.000 Jahre stabil. Damit kann das ursprünglich von Pflanzen assimilierte CO₂ langfristig der Atmosphäre entzogen werden; der Klimawandel würde abgebremst. Biokohle wird seit Tausenden Jahren (und heute etwa in Teilen Brasiliens als *terra preta*) in der Landwirtschaft als Bodenverbesserer, als Trägerstoff für Düngemittel, als Hilfsstoff für die Kompostierung und Nährstofffixierung von Gülle sowie als Futtermittelzusatz und Nahrungsergänzungsmittel produktiv eingesetzt.

Tabelle 1: Techniken zur Reduktion der Konzentration von CO₂ in der Atmosphäre

Maßnahme	CO ₂ -Abscheidung und -lagerung (CCS)	Ozeandüngung durch Mikronährstoffe	Aufforstung	Biokohle	Olivin-Verwitterung
Wirkungspotenzial	theoretisch unbegrenzt	gering (5 Gt CO ₂ /Jahr, -0,5 W/m ²)	gering (4 Gt CO ₂ /Jahr)	gering (5 Gt CO ₂ /Jahr; -0,4 W/m ²)	gering (4 Gt CO ₂ /Jahr)
Physikalische und technische Grenzen der Wirkung	möglicherweise Dichtigkeit der Lager	Veränderung der Ozeanökologie und -chemie	Flächenbedarf	Flächenbedarf	Abbau und Transport
Potenzielle finanzielle Kosten (im Vergleich zu Mitigation)	hoch	niedrig bis mittel	sehr gering	mittel	Mittel
Risiken	Erdbebensicherheit	Verminderte Biodiversität, veränderte wirtschaftliche Nutzung der Ozeane	Einschränkung lokaler Agrar- und Forstwirtschaft, verminderte Nahrungsmittelversorgung	negative Auswirkungen auf Ökosysteme, Landnutzung	Verschlechterung der Wasserqualität

Quellen: Vaughan/Lenton 2011, GAO 2011, Royal Society 2009.

Neben den CDR-Methoden sind weitere Geoengineering-Maßnahmen vorgeschlagen worden. Diese zielen darauf ab, die Sonneneinstrahlung zu vermindern oder die Abstrahlung zu erhöhen (*Solar Radiation Management*, SRM). Damit soll die Energieaufnahme und -abgabe in der Erdatmosphäre auch beim Vorhandensein größerer Mengen von Treibhausgasen in der Balance gehalten werden, sodass kein Erwärmungseffekt eintritt (Tabelle 2).

SRM-Methoden haben einige Vorteile gegenüber anderen Verfahren des Geoengineerings. Da sie direkt auf die Energiebilanz einwirken und nicht wie die CDR-Methoden den Umweg über die Veränderung der CO₂-Konzentration in der Erdatmosphäre gehen müssen, wirken sie unmittelbarer und weit schneller. Außerdem haben zumindest einige unter ihnen nach heutigem Kenntnisstand das Potenzial, einen sehr effektiven Beitrag zur Abschwächung bzw. Vermeidung des Klimawandels zu leisten. Schließlich erscheinen einige Methoden nach heutigem Kenntnisstand und im Verhältnis zu Mitigationsmaßnahmen als sehr kostengünstig. In einer groß angelegten Studie zu Geoengineering kommt etwa die *Royal Society* zu dem Schluss, dass der gleiche Effekt auf den Klimawandel, den eine bestimmte Verminderung der Produktion von CO₂ erzielen würde, durch SRM-Maßnahmen mit einem Tausendstel der Kosten erreicht werden könnte (*Royal Society 2009*, S.35). Diese Einschätzung kann aber nur sehr vorläufig sein und ist umstritten, da viele technische und Kostenfragen noch ungeklärt sind (Rickels/Klepper 2012, siehe auch Klepper in diesem Heft).

Als SRM-Methoden sind bislang unter anderem vorgeschlagen worden:

- **Reflektoren im All.** Dieses exotisch anmutende Verfahren soll nach Einschätzung der *Royal Society* deutlich kostengünstiger

sein als Mitigation, wenn es darum geht, den Klimawandel nachhaltig zu stoppen. Reflektoren vermindern die Sonneneinstrahlung direkt, sodass auch der Effekt auf das Klima bei entsprechender Größenordnung schnell und unmittelbar ist. Technisch ist dieses Verfahren sehr aufwändig und möglicherweise auch in den nächsten Jahrzehnten nicht in größerem Umfang realisierbar, zumindest nicht mit einem Sicherheitsstandard, den die Bevölkerungen in vielen Teilen der Welt von einer solchen Technologie erwarten dürften.

- **Aerosole in der Stratosphäre.** Die von vielen Befürwortern des Geoengineerings bevorzugte SRM-Technologie ist die Einbringung von Schwefelaerosolen in hohe Luftschichten der Atmosphäre. Auf diese Weise wird die Sonneneinstrahlung vermindert und es kommt zu einer Abkühlung der Atmosphäre. Da die Schwebeteilchen aufgrund der Schwerkraft sinken, muss dieser Vorgang dauernd erneuert werden. Aerosole werden auch natürlich in die Erdatmosphäre eingebracht, etwa durch Vulkanausbrüche. Auch durch die Industrialisierung sind Aerosole verstärkt in die Atmosphäre gelangt, allerdings in niedrigere Luftschichten. Die Folgen von Aerosolausbringung sind daher zumindest grob abschätzbar. Zu den zu erwartenden unerwünschten Nebenwirkungen zählen unter anderem eine Verschlechterung der Sicht auf die Sonne, eine stärkere Luftverschmutzung und eine Versauerung von Böden und Gewässern.
- **Modifikation mariner Schichtwolken.** Grundgedanke dieser Technik ist die Erhöhung der Reflektion der Sonneneinstrahlung durch künstliche Wolkenbildung bzw. die Veränderung der Wolkenbildung mit dem Ziel, die Wolken aufzuhellen und ihre Lebensdauer zu verlängern. Dafür sollen Wolkenkondensationskerne (Aerosole, Salzwasser) in die Atmosphäre gebracht werden, die als zusätzliche

Tabelle 2: Techniken zur Modifikation der Ein- und Ausstrahlung von Sonnenenergie (Solar Radiation Management)

Maßnahme	Reflektoren im All	Aerosole in der Stratosphäre	Modifikation mariner Schichtwolken	Modifikation der Erdoberflächenalbedo*
Wirkungspotenzial	theoretisch unbegrenzt (Lenton/Vaughan: -4,23 W/m ²)	theoretisch unbegrenzt (Lenton/Vaughan: -4,23 W/m ²)	groß (-4 W/m ²)	gering bis mittel (-0.15 bis -3 W/m ²)
Physikalische und technische Grenzen der Wirkung	Kontrollmechanismus	Sättigung	Verschmutzung der Troposphäre	hoher Flächenbedarf
Potenzielle finanzielle Kosten (im Vergleich zu Mitigation)	gering	sehr gering	sehr gering	hoch
Risiken	negative Effekte auf Wasserkreisläufe, auf Ozon in der Stratosphäre, biologische Produktivität	negative Effekte auf Wasserkreisläufe, auf Ozon in der Stratosphäre, biologische Produktivität	negative regionale und lokale Wetter-Effekte, Auswirkungen auf Ozeanströmungen und Umweltverschmutzung	negative regionale und lokale Wetter-Effekte, Auswirkungen auf Ökosysteme und Landnutzung

Quellen: *Vaughan/Lenton 2011, GAO 2011, Royal Society 2009.*

* Albedo (von lateinisch *albus* = „weiß“) bezeichnet das Rückstrahlvermögen von nicht reflektierenden Oberflächen.

Kondensationsoberfläche für den Wasserdampf dienen können und damit zu „weißeren“ Wolken führen. Diese Maßnahme ist theoretisch besonders dort effektiv, wo nur wenige Kondensationskerne vorhanden sind, das heißt vor allem über den Ozeanen. Die kleinräumige Erzeugung künstlicher Wolken wird seit einigen Jahrzehnten vor allem für militärische Zwecke vorangetrieben (Fleming in diesem Heft). Kosten und technische Probleme bei der Erzeugung großräumiger Wolkenbildung sind wenig erforscht, ebenso wie die Auswirkungen auf lokale Klimata, insbesondere Niederschlagsmengen und -verteilung sowie Sonneneinstrahlung.

- **Modifikation der Erdoberflächenalbedo.** Helle, insbesondere weiße Oberflächen reflektieren mehr Energie als dunkle. Die Verminderung der von Eis und Schnee bedeckten Anteile der Erdoberfläche ist daher ein Faktor, der zur Erderwärmung beiträgt. Zwar könnte eine Erhöhung der weißen Erdoberflächen als Maßnahme des Geoengineerings auf vielfältige Weise realisiert werden, jedoch kann diese Methode meist nicht die Wirkungsgrade erreichen, die für eine substantielle Verbesserung der Energiebilanz notwendig wären. Vielversprechender erscheint die Bedeckung großer Wüstenflächen mit reflektierendem Kunststoff. Auch hier sind allerdings die Folgen für Natur und Umwelt bisher wenig erforscht; die Risiken werden in der Studie der *Royal Society* von 2009 als sehr hoch eingeschätzt.

In der Praxis müssen sich CDR- und SRM-Maßnahmen nicht ausschließen. Im Gegenteil: Sie können sich theoretisch gut ergänzen; auch mit Mitigationsmaßnahmen könnten sie gekoppelt werden.

4. Allgemeine Argumente für und gegen Geoengineering

Die Befürworter von Geoengineering gehen davon aus, dass die Bemühungen zur Vermeidung der CO₂-Emissionen nicht ausreichen werden, um den Anstieg der globalen Temperatur auf ein einigermaßen verträgliches Niveau zu begrenzen (politisch wurde im Dezember 2010 beim Weltklimagipfel in Kopenhagen eine Erhöhung um 2°C gegenüber dem vorindustriellen Niveau als Obergrenze vereinbart). Geoengineering wird von ihnen als „zweitbeste“ oder „Notlösung“ vorgeschlagen, um weitergehende dramatische Folgen des Klimawandels zu vermeiden (Crutzen 2006; Schneider 2008; Harnisch und Robock in diesem Heft).

Allerdings kann keine der beschriebenen Geoengineering-Methoden rasch in dem Umfang eingeführt werden, der notwendig wäre, um eine messbare Wirkung auf das globale Klima zu erzielen. Zudem ist das Wissen darüber, ob und wie die verschiedenen Methoden tatsächlich einen Beitrag zur Vermeidung der Erderwärmung leisten können und welche weiteren Wirkungen sie haben werden, bei den meisten Vorschlägen begrenzt. Das betrifft alle relevanten Aspekte – von der technischen Machbarkeit über die Kosten bis hin zu den gesellschaftlichen Folgen. Auch über die in diesem Heft betrachteten Folgen für Frieden und Sicherheit lässt sich zur Zeit nur mehr

oder weniger fundiert spekulieren – allerdings lassen sich eine Reihe von möglichen Risiken bereits benennen.

Das vielleicht größte Risiko besteht darin, dass die Mitigation als klimapolitische Maßnahme zugunsten von Geoengineering vernachlässigt werden könnte, insbesondere wenn sich herausstellen sollte, dass das Geoengineering tatsächlich eine kostengünstigere Variante zur Vermeidung des Klimawandels darstellt. Allerdings existieren, wie erwähnt, weder eindeutige Zahlen zu den Kosten noch zur technischen Machbarkeit. Vor allem aber würden auf diese Weise neue Großtechnologien in Anschlag gebracht, um die negativen Folgen der mit der Industrialisierung verbundenen Großtechnologien, nämlich die Reduzierung des Ausstoßes von Kohlenstoff, zu beseitigen.

Es wird daher unter Experten, aber mittlerweile auch in der Öffentlichkeit, kontrovers darüber diskutiert, ob die wissenschaftliche Beschäftigung mit Geoengineering eine dringende Notwendigkeit oder eine unverantwortliche Ablenkung von den eigentlichen Aufgaben darstellt (siehe auch die Beiträge von Harnisch und Robock in diesem Heft). Beide Extrempositionen sind höchst problematisch, schon deshalb, weil der Übergang von Mitigation zu manchen Methoden des Geoengineerings fließend ist – dies ist zum Beispiel bei Aufforstung oder Veränderungen der Landnutzung der Fall. Auch ist es zumindest technisch kein Problem, Methoden der Mitigation und des Geoengineerings nebeneinander zur Anwendung kommen zu lassen. Schließlich ist damit zu rechnen, dass in Zukunft gesellschaftliche Akteure nicht allein darüber entscheiden, ob Geoengineering eingeführt wird oder nicht. Insbesondere, wenn die finanzielle Belohnung für die Vermeidung von CO₂ steigt (etwa weil sich Zertifikate für die Produktion von CO₂ deutlich verteuern), könnten verstärkt privatwirtschaftliche Akteure an der Umsetzung von Geoengineering-Maßnahmen interessiert sein.

Es ist daher sinnvoll, sich mit der Analyse der möglichen Wirkungen von Geoengineering – sowohl der gewünschten Auswirkungen auf den Klimawandel als auch der unerwünschten Folgen – zu beschäftigen. Mögliche Folgen können sich für die natürliche Umwelt und die Lebensbedingungen von Menschen ergeben, aber nicht zuletzt auch für Frieden und Sicherheit. Auf Letzteres soll nachfolgend besonderes Gewicht gelegt werden.

5. Probleme des Geoengineerings für Frieden und Sicherheit⁴

5.1 Globale Konflikte über das Ausmaß von Geoengineering

Verschiedene Methoden des Geoengineerings, sollten sie denn technisch möglich und in großem Maßstab finanziell realisierbar sein, könnten theoretisch wie ein „globaler Thermostat“ wirken. Befürworter von Geoengineering gehen in der Regel davon aus, dass der Temperaturanstieg mit Hilfe entsprechender Methoden auf ein bestimmtes Maß, etwa den Stand der 1990er Jahre, begrenzt werden kann. Jedoch ließen sich theoretisch

⁴ Potenzielle Auswirkungen von Geoengineering auf Frieden und Sicherheit werden ausführlich im Beitrag von Maass/Scheffran in diesem Heft behandelt.

auch andere Temperaturen „einstellen“. Insbesondere das Verbringen von Aerosolen bietet hier erhebliche Möglichkeiten – wobei auch ein nicht-beabsichtigtes „overshooting“ auf Grund der Trägheit des Klimasystems möglich wäre. Insbesondere, wenn keine internationalen Vereinbarungen zur Handhabung von Aerosolen existieren, könnte diese Art des Geoengineerings zu internationalen Konflikten führen. Denn es ist möglicherweise damit zu rechnen, dass nicht alle Regierungen mit der im „Thermostat“ eingestellten Temperatur einverstanden wären. Zudem würden die Kosten und Nutzen global ungleich verteilt sein. Weniger problematisch als SRM wären hier CDR-Maßnahmen. Der gewünschte Gehalt von CO₂ in der Atmosphäre lässt sich vermutlich relativ gut ansteuern, da die Veränderungen über einen längeren Zeitraum erfolgen. Auch sollte es vergleichsweise einfach sein, sich international auf ein Maß an Konzentration von CO₂ (wie etwa das der 1990er Jahre) zu einigen.

5.2 Einzelstaatliche Maßnahmen – globale Wirkung

Mit Geoengineering sollen globale Klimaeffekte erzielt werden, aber die Maßnahmen selbst werden eher lokal zum Einsatz gebracht. Zum Beispiel lassen sich Aerosole auch von einzelnen Staaten in die Stratosphäre einbringen, die großflächige Düngung von Ozeanen kann ebenfalls von Einzelstaaten durchgeführt werden.

Insofern bergen solche Lösungen die Gefahr international nicht abgestimmten Verhaltens, das wiederum andere Staaten als gegen ihre Interessen gerichtet ansehen könnten. Tatsächlich könnten bei fehlender Abstimmung und Koordinierung entsprechende einseitig unternommene Schritte negative Folgen für andere Länder und Regionen haben. So würde sich zum Beispiel die großflächige Ozeandüngung durch einen Staat positiv auf den Klimawandel auswirken, könnte unter Umständen aber in einem anderen Staat zur Verschlechterung der Meeresökologie führen. Ebenso könnten Staaten, die vom Klimawandel (auch) profitieren, etwa weil bestimmte Rohstoffe leichter zugänglich werden, nicht damit einverstanden sein, dass die globale Temperatur ohne ihr Einverständnis wieder gesenkt wird.

Während in manchen Fällen das Vorpreschen einzelner Staaten zum Konflikt führen kann, ist auch der umgekehrte Fall denkbar: Staaten setzen Geoengineering-Maßnahmen, die von der internationalen Gemeinschaft gewünscht werden, nicht durch. Einige Staaten werden in besonderem Maße geeignet sein, Maßnahmen des Geoengineerings umzusetzen, sollten sie sich als technisch und ökonomisch sinnvoll darstellen, wie z.B. starke Aufforstung in Staaten in gemäßigten Zonen. Dann aber stellt sich die Frage, wer die Kosten übernehmen soll, kommt doch das Handeln eines einzelnen auch vielen anderen zugute. Solange es dafür keine internationalen Abkommen gibt, drohen über diese Fragen neue Konflikte zu entstehen.

5.3 Globale und regionale Klimawirkungen

Der Klimawandel wirkt sich bekanntlich schon jetzt regional durchaus unterschiedlich aus. Dies betrifft nicht nur den Temperaturanstieg, sondern vor allem auch die Niederschlagsmengen, -frequenzen und -intensitäten. Auch andere Wetterphänomene wie Stürme werden regional sehr unterschiedlich beeinflusst.

Gleiches gilt auch für effektives Geoengineering. Die regionalen Auswirkungen von Geoengineering, insbesondere auf den Niederschlag, werden sehr unterschiedlich sein. Nicht alle diese Effekte sind erwünscht. Dies gilt vor allem für die indirekten Effekte zum Beispiel auf die Nahrungsmittelproduktion, aber auch auf das persönliche Wohlbefinden von Menschen, wenn sich etwa die Menge an Aerosolen in der Troposphäre erhöht und damit der blaue Himmel ergraut. Werden diese Folgen nicht hinreichend beachtet und im Extremfall auch zwischen den Staaten kompensiert, drohen auch hier Konflikte.

Insbesondere die CDR-Methoden, aber auch die Modifikation der Oberflächenalbedo haben absehbar große, aber regional unterschiedliche Umweltauswirkungen, z.B. auf Biodiversität. Auch hier drohen internationale Konflikte.

5.4 Globale und lokale Folgen

Lokal unterschiedliche Klima- und Umweltwirkungen können auch innerhalb von Staaten auftreten – dies gilt zumindest für größere Länder. Hier können dann dieselben Fragen über Kostenteilung und Kompensation auftreten wie zwischen Staaten.

5.5 Konflikte durch Flächennutzung

Das vielleicht größte Konfliktpotenzial einer Reihe von Geoengineering-Methoden – Modifikation der Albedo, CCS mit Bioenergie, Aufforstung und mit Abstrichen auch Biokohle und Olivin-Verwitterung – liegt im Bedarf an großen Flächen für deren Anwendung. Wie die aktuelle Ausweitung der Flächen zur Erzeugung von bioenergetischen Rohstoffen gezeigt hat, besteht trotz theoretischer Alternativen de facto eine starke Konkurrenz zur Nahrungsmittelproduktion. Lokal wächst häufig der politische Druck zur Flächenausweitung auf Land, für das nur schwache Eigentumsrechte bestehen, weil es von traditionellen oder indigenen Bevölkerungsgruppen bewohnt wird oder weil es sich um Schutzgebiete handelt. Damit können, dies wird schon heute bei Bioenergie im kleinen Maßstab deutlich, lokale Konflikte hervorgerufen oder geschürt werden.

6. Zusammenfassung und Ausblick

Geoengineering ist aus mehreren Gründen eine scheinbar attraktive Option, die vielfach erwarteten massiven Folgen des Klimawandels abzuschwächen oder gar zu beseitigen. Zumindest einige Methoden sind möglicherweise politisch relativ leicht umzusetzen, da sie kostengünstiger erscheinen als Bemühungen um Mitigation. Die technischen und wirtschaftlichen

Risiken des Geoengineerings sind allerdings gegenwärtig nicht genau abzuschätzen. Zudem ist offensichtlich, dass viele Maßnahmen spürbare Nebeneffekte haben werden, die ebenfalls bisher erst in Ansätzen erforscht sind.

Das gilt auch für die potenziellen Risiken für die Umwelt sowie für Frieden und Sicherheit. Eine sehr vorläufige Zusammenstellung auf der Grundlage des bisherigen Stands der Forschung (Tabelle 3) zeigt, dass auch diejenigen Geoengineering-Methoden, die in Bezug auf ihren möglichen Beitrag zur Vermeidung des Klimawandels (Effektivität) und die aufzuwendenden Kosten besonders gut abschneiden (Aerosole in der Stratosphäre und Aufforstung), hohe Risiken für Umwelt, Frieden und Sicherheit mit sich bringen. Zu denken geben sollte, dass die Methode, die von der Studiengruppe der *Royal Society* als am wenigsten risikoträchtig angesehen wird – nämlich die Abscheidung und Lagerung von CO₂ – genau jene Technologie ist, die zumindest in Deutschland wegen mangelnder Akzeptanz in der Bevölkerung nur wenig Zukunft zu haben scheint.

Tabelle 3: Vergleichende Einschätzung ausgewählter Techniken des Geoengineerings

	Effektivität	Kosten	Risiken
Ozeandüngung durch Mikro-nährstoffe	2	3	1
Aerosole in der Stratosphäre	4	4	2
Modifikation mariner Schichtwolken	2,5	3	2
Reflektoren im All	4	1,5	3
Modifikation der Erdoberflächenalbedo	1,75	1	3
Biokohle	2	2	3
Aufforstung	2	5	4
Olivin-Verwitterung	4	2,1	4
CO ₂ -Abscheidung und Lagerung (CCS)	3	3	5

Anmerkung: 1 ist die schlechteste, 5 die beste Bewertung; zur Grundlage der Einschätzungen siehe die detaillierteren Informationen in den Tabellen 1 und 2; Quelle: *Royal Society 2009, S. 20, 36.*

Die wichtigsten Risiken für Frieden und Sicherheit betreffen nach gegenwärtigem Stand des Wissens das einseitige Vorgehen einzelner Staaten auf Kosten anderer, die unterschiedlichen regionalen und lokalen Auswirkungen global wirkender Methoden des Geoengineerings sowie die Folgen eines wachsenden Flächenbedarfs bei der Anwendung zumindest einiger Methoden. Dies sind schwierige Fragen, die zusätzlich zu den technischen Problemen und den Umweltfolgen erörtert werden müssen. Um internationale und innerstaatliche Konflikte zu vermeiden, die durch Geoengineering hervorgerufen werden könnten, bedarf es eines weit höheren Maßes an internationaler Kooperation und Bereitschaft zur Kompensation negativer Folgen, als dies zurzeit der Fall ist.

Literaturverzeichnis

Blackstock, J. J. und J. C. S. Long (2010), *The Politics of Geoengineering*, *Science*, 327, 527.

Conca, K und G. Dabelko (2010), *Green Planet Blues: Four Decades of Global Environmental Politics*, 4th ed. Westview Press, Boulder, CO.

Crutzen, P. J. (2006), Albedo enhancement by stratospheric sulfur injections: A contribution to resolve a policy dilemma?, *Climatic Change*, 77, 211-219.

Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, C. Field, V. Barros, T. Stocker, Q. Daher, J. Minx, K. Mach, G.-K. Plattner, S. Schlömer, G. Hansen und M. Mastrandrea (Hg.) (2012): *IPCC Expert Meeting on Geoengineering*. Lima, Peru, 20-22 June 2011. *Meeting Report*. Verfügbar unter <http://www.ipcc-wg3.de/publications/supporting-material-1/EM-GeoE-Meeting-Report-final.pdf> (19. Juni 2012).

Fleming, J. (2010), *Fixing the Sky*, New York: Columbia University Press.

Government Accountability Office (GAO) (2011), *Climate engineering. Technical status, future directions, and potential responses*, GAO-11-71, Washington, D.C. <http://www.gao.gov/products/GAO-11-71>.

Keith, D. W., E. Parson und M. G. Morgan (2010), Research on global sun block needed now, *Nature*, 463, 426-427.

Klepper, G. und W. Rickels (2012), *The Real Economics of Climate Engineering*, Kiel Institute for the World Economy.

Köhl, M., R. Hildebrandt, K. Olschofsky, R. Köhler, T. Rötzer, T. Mette, H. Pretzsch, M. Köthke, M. Dieter, M. Abiy, F. Makeschin und B. Kenter (2010), Combating the effects of climatic change on forests by mitigation strategies, *Carbon Balance Management*, 5.

Maas, A., M. Brzoska, P. M. Link, G. Neuneck und J. Scheffran (2012), Direkte Eingriffe ins Klima. Eine friedenspolitische Herausforderung? Tagung am KlimaCampus Hamburg. *Wissenschaft & Frieden*, 1/2012, 44-45.

Maas, A. (2012), Konfliktpotentiale von Climate Engineering. *Wissenschaft und Frieden*. 3/2012, 35-38.

Ornstein L., I. Aleinov und D. Rind (2009), Irrigated Afforestation of the Sahara and the Australian Outback to end Global Warming. *Climatic Change*, 97, 409-437.

Rickels, W., G. Klepper und J. Dovern (Hrsg.) (2011), *Gezielte Eingriffe in das Klima? Eine Bestandsaufnahme der Debatte*, Kiel Earth Institute im Auftrag des Bundesministerium für Bildung und Forschung, Kiel 2011, http://www.bmbf.de/pubRD/CE_Studie2011-Gesamt-final-Druck.pdf.

Robock, A. (2008), 20 Reasons why Geoengineering may be a bad Idea. *Bulletin of the Atomic Scientists*, 64, 14-18.

Robock, A., A. Marquardt, B. Kravitz und G. Stenchikov (2009), Benefits, risks, and costs of stratospheric geoengineering, *Geophysical Research Letters*, 36.

Royal Academy of Sciences (2009), *Geoengineering the climate: Science, governance and uncertainty*, London, http://royalsociety.org/uploadedFiles/Royal_Society_Content/policy/publications/2009/8693.pdf.

Scheffran, J., M. Brzoska, J. Kominek, P. M. Link und J. Schilling (2012), Climate change and violent conflict, *Science*, 336, 869-871.

Scheffran, J.; M. Brzoska, H. G. Brauch, P. M. Link, and J. Schilling (eds.) (2012), *Climate Change, Human Security and Violent Conflict: Challenges for Societal Stability*, Berlin: Springer.

Schellnhuber, H. J. (2011), Geoengineering: The good, the MAD, and the sensible, *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, 108, 20277-20278.

Schneider, S. H. (2008), Geoengineering: could we or should we make it work?, *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 366, 3843-3862.

Tänzler, D., A. Maas und A. Carius (2012), Climate Change Adaptation and Peace. *Wileys Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 1, 741-750.

UNESCO und Intergovernmental Oceanographic Commission (IOC) (2010), *IOC Report on Ocean Fertilization*, Paris, http://portal.unesco.org/science/en/ev.php-URL_ID=9134&URL_DO=DO_TOPIC&URL_SECTION=201.html

United Nations Security Council (UNSC) (2012), *Statement by the President of the Security Council on "Maintenance of Peace and Security: Impact of Climate Change"*, S/PRST/1011/15, 20 July 2011, <http://daccess-dds-ny.un.org/doc/UNDOC/GEN/N11/424/28/PDF/N1142428.pdf?OpenElement>.

Vaughan, N. R. und T. M. Lenton (2011), A review of climate geoengineering proposals, *Climatic Change*, 109, 745-790.

Climate Conflicts 2.0? Climate Engineering as a Challenge for International Peace and Security

Achim Maas and Jürgen Scheffran*

Abstract: This article reviews the conflict potential of climate engineering (CE) against the background of possible security implications of climate change. A conceptual framework is used to compare the technologies for carbon removal and solar radiation management regarding different characteristics and to assess the causes and drivers of potential conflict. Although CE measures may possibly reduce climate-related conflicts, they could also intensify already existing international conflict structures or add new dimensions of conflict, in particular if their impacts are highly uncertain, quick, strong and heterogeneous, where the severity can vary regionally. While carbon engineering requires large resources and thus may contribute to resource conflicts, solar engineering is usually less costly and more efficient, but has numerous anticipated side-effects that could cause novel conflicts and security implications in the international system. To avoid serious conflicts, regulative mechanisms and institutional structures are needed, building on the ENMOD-Convention that restrains military or hostile use of environmental modification. Given the high uncertainties, anticipative and adaptive governance structures that involve stakeholders and their perspectives are necessary.

Keywords: Climate conflict, climate engineering, security risks
Klimakonflikt, Klima-Engineering, Sicherheitsrisiken

1. Introduction and Overview

In July 2011, the United Nations Security Council (UNSC) identified climate change as a possible risk for international peace and security (UNSC 2011). Many other international bodies, such as the European Union and the Organization for Security and Co-operation in Europe did so before, and a significant amount of scientific literature on the security risks of climate change has emerged (see Scheffran et al. 2012a). Though much research needs to be done to better understand

how climate change affects violent conflict (see Scheffran et al. 2012b), it has been widely acknowledged that climate change has the potential to increase the risks of violent conflict and create multiple threats to human security and livelihood, including increasing food insecurity, water scarcity and natural disasters (e.g. WBGU 2008).

Against this background, climate engineering (CE)¹ could be considered as an instrument for conflict prevention and risk mitigation, should emission reductions occur not fast enough or climate sensitivity be higher than expected. Also, CE could

* Achim Maas, Institute for Advanced Sustainability Studies, Potsdam. Prof. Dr. Jürgen Scheffran, Research Group Climate Change and Security, KlimaCampus, Institute of Geography, University of Hamburg.

1 Of the many terms proposed (see Bellamy et al. 2012 for an overview) we use climate engineering, as it most accurately reflects the focus, i.e. intervening into the climate systems.