

Streitkräfte, Fähigkeiten und Technologien im 21. Jahrhundert

Future Topic

Geoengineering



Streitkräfte, Fähigkeiten und
Technologien im 21. Jahrhundert

Future Topic

Geoengineering

Impressum

Herausgeber

Planungsamt der Bundeswehr
Dezernat Zukunftsanalyse
Oberspreestraße 61L
12439 Berlin

E-Mail: plgabwdezzuka@bundeswehr.org

Layout und Druck

Mandy Hoppe
Print- und Medienzentrum
Wehrbereichsverwaltung Ost

Titelbilder:

Von links nach rechts:

Bild 1: © Fyle / fotolia.com

Bild 2: Clouds on the way to DC, Foto von Karin Dalziel
<http://www.flickr.com/photos/nirak/644335254/>
(cc) BY 2.0 <http://creativecommons.org/licenses/by/2.0/deed.en>

Bild 3: NASA GOES-11 West Coast view March 11, 2010, Foto von NASA Goddard
Space Flight Center
<http://www.flickr.com/photos/gsfcr/4511092883/>
(cc) BY 2.0 <http://creativecommons.org/licenses/by/2.0/deed.en>

Bild 4: 20100715-IMG_1252, Foto von bilderheld
<http://www.flickr.com/photos/superzelle/4794778596/>
(cc) BY 2.0 <http://creativecommons.org/licenses/by/2.0/deed.en>

Bild 5: © Andrey Kuzmin / fotolia.com

Inhalte der Studie:

© Planungsamt der Bundeswehr, Dezernat Zukunftsanalyse

Alle Rechte vorbehalten. Reproduktion und Veröffentlichung nur nach ausdrücklicher Genehmigung durch das Planungsamt der Bundeswehr, Dezernat Zukunftsanalyse.

November 2012

Vorwort

Das Planungsamt der Bundeswehr (vormals Zentrum für Transformation der Bundeswehr) bündelt Aufgaben, Kompetenzen und Verantwortung im Planungsnetzwerk für die Bundeswehr auf der dem BMVg nachgeordneten Ebene. Es stellt Methodenkompetenz und wissenschaftliche Werkzeuge für die Bundeswehr bereit und erarbeitet die Grundlagen für die zukünftige Ausrichtung der Bundeswehr.

In diesem Rahmen dient Sicherheitspolitische Zukunftsanalyse dem Zweck, frühzeitig und auf wissenschaftlicher Basis Erkenntnisse für die Fortschreibung konzeptioneller Vorgaben und Ziele zu gewinnen. Sie liefert ergebnisoffen und weisungsungebunden Ideen und Impulse für die zukünftige Ausrichtung der Bundeswehr und ist somit ein zentraler Bestandteil der Zielbildung.

Die Studien des Dezernats Zukunftsanalyse werden ressort-intern erstellt. Neben militärischer Expertise werden vor allem Erkenntnisse ziviler wissenschaftlicher Einrichtungen sowie verschiedener Ressorts des Bundes genutzt. Gleichwohl sind die Ergebnisse nicht mit anderen Ressorts und Forschungseinrichtungen abgestimmt und sollen auch keinen Eingriff in deren Verantwortlichkeiten darstellen. Die Studienarbeiten des Dezernats Zukunftsanalyse spiegeln keine offiziellen Positionen des BMVg wider.

Inhalt

Geoengineering – Eine sicherheitspolitische Perspektive..... 3

1. Was ist Geoengineering und wann könnte es eingesetzt werden?.....	4
2. Wie könnte Geoengineering eingesetzt werden?	4
3. Was sind die Risiken und Streitpunkte eines Einsatzes von Geoengineering?	5
4. Wie ist Geoengineering rechtlich geregelt?	6
5. Wer könnte Interesse an einem Einsatz von Geoengineering haben?.....	7
6. Was bedeutet ein Einsatz von Geoengineering für die Sicherheit von Staaten?	8
7. Fazit	11

Anhang

Endnoten	13
Anlage 1: Forschungsstand zu Methoden des Geoengineerings.....	17
Literatur	35
Autoren	39

Geoengineering – Eine von vielen möglichen Zukünften¹

Pressemeldung 01.02.2027 „Wirtschaftsmacht macht Geoengineering“

Der Staatschef einer der neuen Wirtschaftsmächte verkündete heute auf einer Pressekonferenz in der Hauptstadt eine Zeitenwende in der Klimapolitik. Da die bisherigen klimapolitischen Anstrengungen der internationalen Gemeinschaft keine Wirkung zeigten, so der Staatschef, hätte sein Land sich entschlossen, dem Klimaproblem durch den Einsatz von Geoengineering entgegenzutreten. Er nehme Bedenken der internationalen Partner des Landes ernst, betonte aber: „Das Abschmelzen von Gebirgsgletschern bedroht unsere Wasserversorgung. Dürren bedrohen unsere Ernten. Allein in den letzten Jahren sind tausende Mitbürger bei Extremwetterereignissen ums Leben gekommen. Zwar sind wir uns der Risiken bewusst, doch in dieser Situation muss man handeln.“

Pressemeldung 16.05.2027 „Krisengipfel der Geo-Gegner“

Heute trafen sich die Staatschefs des europäischen Kontinents in Brüssel, um das weitere Vorgehen gegen den drohenden Einsatz von Geoengineering zu beschließen. Der Präsident eröffnete den Gipfel mit den Worten: „Geoengineering ist inakzeptabel, ein unverantwortliches Spiel mit unserer Zukunft!“ Zuvor waren Verhandlungen über ein Geoengineering Moratorium in der Hauptversammlung der UN gescheitert. Dennoch können sich die europäischen Staatsoberhäupter der Unterstützung einer ganzen Reihe weiterer Staaten gewiss sein, die sich vor möglichen Nebenfolgen des Geoengineerings fürchten. Die USA hingegen haben bisher noch keine klare Position bezogen und sich bei der Abstimmung enthalten.

Das Treffen wurde von zahlreichen Demonstrationen begleitet. Nachdem es bereits in den letzten Wochen zu massiven weltweiten Protesten kam, demonstrierten am Verhandlungstag diesmal allein in Brüssel, Paris, Berlin und London schätzungsweise über 1,5 Millionen Menschen.

Pressemeldung 20.06.2027: „Der Ton wird härter“

Der Sprecher des amerikanischen Präsidenten hat für morgen Vormittag eine Pressekonferenz angekündigt, in der sich der Präsident zu der gestrigen Bekanntgabe des offiziellen Starts der Geoengineering Programme einer der neuen Wirtschaftsmächte äußern wird. Die Einschätzungen darüber, wie sich der Präsident positionieren wird, gehen weit auseinander. Der Ton in der gesellschaftlichen und politischen Debatte über Geoengineering ist in den letzten Wochen härter geworden. Sowohl Gegner als auch Befürworter mobilisierten in den USA ihre Gefolgschaft. Medienkampagnen beider Lager sorgten für eine aufgeheizte Stimmung. Gegner des Geoengineerings forderten, die „Zerstörer der göttlichen Schöpfung“ und „Klimafuscher“ notfalls mit militärischen Mitteln von ihren Vorhaben abzuhalten.

Auch in Europa gab es in den letzten Wochen wieder Protestmärsche. Immer häufiger kam dabei die Forderung auf, das „Ende der Welt“ mit Waffengewalt aufzuhalten. Medien und einzelne Politiker fingen an, sich mit dieser Option ernsthaft auseinanderzusetzen

Geoengineering – Eine sicherheitspolitische Perspektive

„Jeder redet über das Wetter, aber keiner tut etwas dagegen.“ (Mark Twain)

Bereits seit Jahrhunderten versucht der Mensch, das Wetter zu seinen Gunsten zu beeinflussen, etwa um Regen zu erzeugen – sei es durch traditionelle Riten wie Regentänze oder die ersten technischen Versuche mit Explosivstoffen im 19. Jahrhundert.² Heutzutage geht es jedoch nicht mehr nur um die Beeinflussung lokaler Wetterphänomene. Vielmehr wird diskutiert, das globale Klima nach dem Willen des Menschen zu formen. Mit Geoengineering werden hierfür zunehmend Möglichkeiten erforscht. Der Begriff bezeichnet Eingriffe in das globale Klimasystem mit dem Ziel, den Klimawandel abzuschwächen und dem Anstieg der

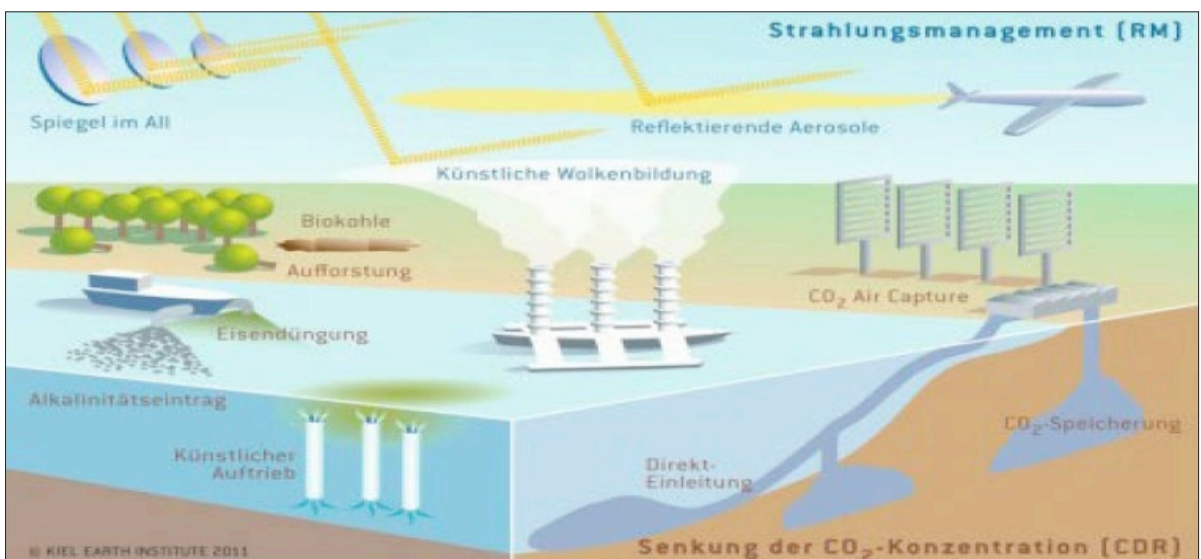
Durchschnittstemperatur entgegen zu wirken.³

Das vorliegende *Future Topic* diskutiert die mit einem möglichen Einsatz von Geoengineering einhergehenden sicherheitspolitischen Implikationen.

Zunächst wird dargelegt, was unter Geoengineering verstanden wird, wie es zur Vermeidung eines gefährlichen Klimawandels verwendet und wann es zum Einsatz gebracht werden könnte.

Anschließend werden vorhandene und zu entwickelnde Technologien in Bezug auf ihre Risiken, weitere Streitpunkte, relevante rechtliche Rahmenbedingungen sowie mögliche Motivationen einzelner Staaten zum Eingriff in das Klima dargestellt und bewertet.

Abbildung 1: Die zwei Arten von Geoengineering und deren Methoden



Quelle: Rickels et al. (2011: 9)

Die Analyse kommt zu dem Zwischenergebnis, dass ein möglicher zukünftiger Einsatz von Geoengineering verschiedene sicherheitspolitisch relevante Dimensionen aufweisen würde. Diese werden im dritten Abschnitt beschrieben.

Der akute Handlungsbedarf für die Bundeswehr ist eher gering. Allerdings kann zukünftig ein möglicher Einsatz von Streitkräften bei einem Konflikt in Folge des Einsatzes von Geoengineering nicht ausgeschlossen werden. Auch der Schutz der, für einen Eingriff in das Klimasystem nötigen, zivilen Infrastruktur oder die Bereitstellung militärischer Infrastruktur hierfür wären denkbare Optionen für den Einsatz der Bundeswehr in diesem Zusammenhang.

1. Was ist Geoengineering und wann könnte es eingesetzt werden?

Prinzipiell gibt es zwei verschiedene Arten des Geoengineering, die in der Abbildung 1 dargestellt sind.⁴

Das *Carbon Dioxide Removal* (CDR) soll eine Reduzierung der Kohlendioxidkonzentration der Atmosphäre erreichen.

Das *Solar Radiation Management* (SRM) soll den Strahlungshaushalt der Erde beeinflussen, so dass die Sonneneinstrahlung die Erde weniger aufwärmt. Ein Ansatz innerhalb des SRM versucht hierzu, das Reflektionsvermögen (Albedo) der Erdoberfläche oder der oberen Luftschichten zu erhöhen. Es gibt auch Ansätze, durch technische Anlagen (Reflektoren) im Weltall die Sonnenstrahlung bereits am Erreichen der Erde zu hindern. Die Methoden sind vielfältig und ihre Beschreibung würde den Rahmen des Future Topics sprengen. Die Beschreibung der Technologien (Wirkweise, Forschungsstand, Kosten und Effektivität sowie mögliche Nebenfolgen) ist im Anschluss an den

Text, im Anhang (Anlage 1) zu finden.

Die Befürworter heben insbesondere das Potenzial von SRM-Maßnahmen hervor. Diese würden zeitnah wirken können und eine hohe Effizienz besitzen.⁵

Für die meisten Technologien des Geoengineering gilt, dass sie noch nicht ausgereift und sicher einsetzbar sind. Hier gibt es noch erheblichen Bedarf in der Grundlagenforschung, um einen effektiven und sicheren Einsatz zu ermöglichen.⁶ Langfristig und unter Annahme weiterer Forschungserfolge erscheint ein Einsatz technologisch möglich. Es ist umstritten, wie diese Grundlagenforschung zukünftig strukturiert und finanziert werden soll. Kritiker, wie die nicht-staatliche *Action Group on Erosion, Technology and Concentration* (ETC-Group) und Wissenschaftler, zum Beispiel des *Oxford Geoengineering Programmes* (*Oxford Principles*), fordern bereits eine Nichtpatentierbarkeit und grundlegende *Open-Source* Forschung, um privatwirtschaftliche Interessen zu reduzieren.⁷ Wenn sich diese Forderung durchsetzt und gleichzeitig die Grundlagenforschung weiter durch staatliche Gelder finanziert wird, könnte in Zukunft das Wissen einer noch breiteren Anzahl von Akteuren zur Verfügung stehen. Dieses würde dann ein potenzielles Risiko, zum Beispiel „Einsatz von Geoengineering durch nicht-staatliche Akteure“, nach sich ziehen.

2. Wie könnte Geoengineering eingesetzt werden?

Die Folgen des Klimawandels sind bereits heute eine ernstzunehmende globale Herausforderung.⁸ Vor diesem Hintergrund hat die internationale Gemeinschaft das „2 °C-Ziel“ beschlossen. Der Anstieg der globalen Durchschnittstemperatur soll im Vergleich zum vorindustriellen Zeitalter dau-

erhaft auf maximal 2°C begrenzt werden. Dieses Ziel ist bereits aus heutiger Sicht kaum noch zu erreichen. Der politische Wille auf globaler Ebene, die nötigen Maßnahmen aktiv und mit Nachdruck umzusetzen, erscheint dafür nicht stark genug ausgeprägt.⁹

Bisher ruht die Klimapolitik auf zwei Säulen. Eine Säule besteht aus Maßnahmen, die auf eine Reduzierung des Ausstoßes von Treibhausgasen (z.B. CO₂) abzielen. Die zweite Säule sind Maßnahmen, die eine Anpassung an bereits nicht mehr zu verhindernde Folgen des Klimawandels befördern, wie zum Beispiel die Finanzierung von baulichen Maßnahmen zum Hochwasserschutz oder für ein besseres Regenwassermanagement. Geoengineering könnte als dritte Säule in der internationalen Klimapolitik fungieren.¹⁰

Hierbei sind unterschiedliche Optionen zur Gewichtung denkbar. Geoengineering könnte die primär tragende Säule internationaler Klimapolitik werden. Ein solcher Ansatz wird von Befürwortern jedoch meist nur implizit geäußert und scheint darüber hinaus wenig sinnvoll.¹¹ Bei Anwendung der von Befürwortern favorisierten SRM-Maßnahmen, würde die Erde lediglich künstlich gekühlt werden. Die Ursache des Klimawandels, Emission von Treibhausgasen, würden jedoch nicht bekämpft werden. Folglich würden Staaten weiterhin massiv Treibhausgase ausstoßen, weil sie nicht mehr auf eine Reduzierung angewiesen wären. Die eigentliche Ursache des Klimawandels, die zu hohe Konzentration von Treibhausgasen in der Atmosphäre, würde sich damit sogar verschlimmern. Auch das mit Emissionen verbundene Problem der weiter steigenden Preise für fossile Ressourcen bliebe in diesem Falle bestehen. Eine solche Gewichtung bietet damit keine nachhaltige Lösung und erscheint eher unwahrscheinlich. Als zweite Option könnte es als Brückentechnologie genutzt werden, um Zeit für eine notwendige Transformation in ein postfossiles Zeital-

ter zu gewinnen.¹² Die meisten Befürworter sprechen sich für diese Möglichkeit aus.¹³

Neben diesen beiden Möglichkeiten könnte der Einsatz als Notfalllösung erforderlich werden. Dieses wäre der Fall, wenn sich der Klimawandel unerwartet schnell beschleunigt (*Tipping Points*) und zu drastischen Folgen, wie einem drohenden Kollaps von ökologischen und gesellschaftlichen Systemen, führen würde.¹⁴

Geoengineering könnte auch grundsätzlich von Staatengruppen, einzelnen Staaten und gar von finanzstarken nicht-staatlichen Akteuren eingesetzt werden.¹⁵ Hierdurch könnte sich die Grundlogik heutiger global konsens- und partizipationsbedürftiger Klimapolitik drastisch wandeln. Statt alle Länder zu überzeugen, den Klimawandel zu bekämpfen, könnte internationale Klimapolitik quasi im Alleingang von einigen wenigen Ländern betrieben werden. Dann würden nur noch die Kostenfrage für den Einsatz und dessen Nebenfolgen im Fokus stehen. Das heutige hochkomplexe Feld einer globalen und umfassenden Teilhabe an Klimamaßnahmen könnte umgangen werden.¹⁶ Das bei einer so nicht global abgestimmten Vorgehensweise entstehende Konfliktpotenzial wird bei den Befürwortern stark vernachlässigt, erscheint jedoch offensichtlich.

3. Was sind die Risiken und Streitpunkte eines Einsatzes von Geoengineering?

Es gibt massive Kritik- und Streitpunkte in Bezug auf die Risiken des Einsatzes von Geoengineering, die sich auch deutlich in der ablehnenden Haltung der Bundesregierung widerspiegeln.¹⁷ Das zentrale Problem insbesondere von SRM-Maßnahmen sind zahlreiche, zum Teil bereits bekannte Nebenfolgen. Im Kern der Diskussion um Ne-

benfolgen lässt sich festhalten, dass selbst bei einem erfolgreichen Eingriff ein menschlich geschaffenes Klima entstehen wird, das neue und gegebenenfalls sehr nachteilige Charakteristika besitzen würde. Selbst wenn man also die Erde gar auf die Temperatur des vorindustriellen Zeitalters abkühlt, wäre das künstliche Klima nicht mit dem ursprünglich natürlichen Zustand identisch.¹⁸ Weiterhin würde etwa neben einer massiven Veränderung der globalen Niederschlagsverteilung auch die Biodiversität (globale Artenvielfalt) massiv negativ beeinflusst werden können. Dieses Problem wird auch noch dadurch verschärft, dass die nachteiligen Folgen regional und lokal sehr unterschiedlich ausfallen würden.¹⁹ Folgt man etwa einem der zentralen Kritiker solcher Technologien, würden allein die eben kurz skizzierten Nachteile bei SRM-Technologien gar einen zukünftigen Einsatz gänzlich unwahrscheinlich machen.²⁰

Ein weiterer relevanter Kritikpunkt zielt auf zusätzliche unkalkulierbare Risiken ab. Diese ergeben sich daher, dass ein großskaliges globales Experiment immer gleich ein unumkehrbarer Einsatz wäre.²¹ Folglich können keine Experimente auf globaler Ebene durchgeführt werden, sondern die globalen Folgen müssen modelliert werden. Ein solches Modell und die dahinter stehende Theorie können jedoch die ganze Komplexität des Klimasystems und der betroffenen Ökosysteme nicht vollständig abbilden. Hierdurch entsteht die hohe und in Augen von Kritikern unverantwortbare Gefahr nicht kalkulierbarer Nebenfolgen.²²

Es gibt auch aus ethischer Sicht Argumente gegen Geoengineering. Kritiker gehen davon aus, dass dieses ausgerechnet von den Ländern eingesetzt werden könnte, die den höchsten Ausstoß an Treibhausgasen (Hauptemittenten) produzieren und somit auch hauptverantwortlich für den Klimawandel sind. Über die Nebenfolgen, insbesondere in strukturschwachen Regionen der Welt, würde damit ein ungleicher

sowie ungerechter Transfer der Risiken und Folgekosten des Klimawandels auf arme Entwicklungsländer des Südens stattfinden.²³

Ein Einsatz von Geoengineering müsste langfristig fortgeführt werden. Dies impliziert einen ebenso ungerechten Transfer auch auf nachfolgende Generationen.²⁴ Bei einer Unterbrechung von SRM-Maßnahmen ohne Emissionsreduzierung würde nämlich weiterhin eine sehr hohe CO₂ Konzentration existieren. Würde man trotz dieser Konzentration SRM-Maßnahmen stoppen, wären Kaskadeneffekte und ein abrupter Anstieg der Temperatur sehr wahrscheinlich.²⁵ Diese kurzfristigen Veränderungen würden dann ökologische und gesellschaftliche Systeme destabilisieren. Um diesen Entwicklungen vorzubeugen, wäre eine Fortführung zukünftig ohne Alternative. Bei CDR-Maßnahmen hingegen bestünde das Problem, dass man das gefilterte CO₂ dauerhaft speichern muss und somit ein weiteres Endlagerproblem hat. Auch in diesem Falle würden die Risiken und Kosten auf die kommende Generationen übertragen.²⁶

4. Wie ist Geoengineering rechtlich geregelt?

Für die rechtliche Beurteilung des Einsatzes von Geoengineering ist aufgrund der möglichen globalen Nebenfolgen das Völkerrecht ausschlaggebend.²⁷ Dort existiert derzeit weder eine verbindliche Definition noch eine direkte Regulierung oder gar ein Verbot.²⁸ So verbietet zwar das Umweltkriegsabkommen (ENMOD)²⁹ die Modifikation der Natur zu militärischen Zwecken, es umfasst jedoch nicht das Thema selber. Geoengineering hat per Definition nicht das Ziel der Kriegsführung sondern die Bekämpfung des Klimawandels. Somit kann es lediglich indirekt über den Eintritt der Nebenfolgen reguliert werden. Diese fallen bei SRM-Maß-

nahmen massiver aus als bei CDR-Maßnahmen. Daher wird von völkerrechtlicher Seite den SRM-Maßnahmen auch eine deutlich größere Skepsis als CDR-Maßnahmen entgegengebracht.³⁰ Eine indirekte Regulierung könnte erfolgen, weil eine mögliche Nebenfolge eine völkerrechtlich unzulässige Modifikation oder gar Verschmutzung von sogenannten globalen Gütern - wie etwa der Hochsee oder dem Weltall - verursachen könnte.³¹ Daneben könnten potenziell auch Umweltschutzgüter betroffen werden, wie zum Beispiel das „natürliche Klima“ selbst, die Biodiversität (globale Artenvielfalt) oder die Ozonschicht.³² Ein letzter Aspekt greift das grenzüberschreitende Ausmaß möglicher Nebenfolgen auf. Hierdurch würde das Grundprinzip der territorialen Integrität von betroffenen Staaten berührt und verletzt, falls diese einem Einsatz nicht zustimmen, aber dennoch betroffen wären.

Ein generelles Problem aus rechtlicher Sicht wäre die praktische Frage, wie ein solcher Einsatz als Verstoß verifiziert, überwacht und sanktioniert werden könnte.³³ Auch das mögliche Risiko des *Dual-Use* wird rechtlich bisher kaum aufgegriffen.

5. Wer könnte Interesse an einem Einsatz von Geoengineering haben?

Auf internationaler Ebene hat die Diskussion über Geoengineering vor wenigen Jahren begonnen und nimmt derzeit weiter zu. Bei der *United Nations Environmental Programme-Convention on Biodiversity (UNEP-CBD)* wurde beispielsweise dieses Jahr ein Anwendungsmoratorium beschlossen.³⁴ Dieses ist völkerrechtlich aus verschiedenen Gründen nicht zwingend verbindlich. Auch im kommenden Bericht des *Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)* wird dieses Thema aufgegriffen werden und somit Teil

der Debatte der internationalen Klimapolitik. Trotz dieser anlaufenden politischen Debatten zeigt sich bereits gegenwärtig, dass länder- und regionalspezifische Unterschiede in den Einstellungen zu Geoengineering bestehen. Diese leiten sich ab aus der jeweiligen Betroffenheit durch den Klimawandel, den Kosten und Willen für eine Umstellung zu einer postfossilen Gesellschaft (konventionelle Klimapolitik) und der gesellschaftlichen Einschätzung.

So kann Geoengineering beispielsweise aufgrund einer hohen Betroffenheit durch den Klimawandel und seiner Folgen, gepaart mit hohen Kosten für konventionelle klimapolitische Maßnahmen (Wandel zu einer postfossilen Gesellschaft), eine attraktive Option darstellen. Ein Eingriff in das globale Klima wäre dann trotz damit verbundener Kosten/Risiken für manche Länder wünschenswert.³⁶

Untersuchungen zeigen, dass in Zukunft voraussichtlich China, Indien, die Vereinigten Staaten von Amerika und Brasilien von dem Klimawandel besonders betroffen sein werden.³⁷ Daneben werden aber voraussichtlich auch strukturschwache Regionen betroffen sein. Hierzu zählen die MENA-Region, Sub-Sahara Afrika, Teile von Mittel- und Südamerika sowie die Pazifikregion. Die möglichen Auswirkungen des Klimawandels in der MENA-Region wurde durch das Dezernat Zukunftsanalyse in der Studie „Klimawandel im Kontext“ detailliert untersucht.³⁸ Europa hingegen wird vermutlich nur gering betroffen sein.³⁹ Hohe Kosten für eine Transformation hin zu einer postfossilen Gesellschaft werden zukünftig insbesondere die Hauptemittenten haben. Die größten Emittenten von Treibhausgasen sind derzeit die Vereinigten Staaten von Amerika, die Europäische Union, China, Indien und Russland.⁴⁰

Bereits heute zeigen im Gegensatz zu Europa, als dem führenden Akteur konventioneller Klimapolitik, schnell wachsende Emittenten, wie China und Indien, aber auch etablierte Mächte, wie die Vereinigten

Staaten von Amerika, nur eine geringe Bereitschaft für konventionelle Klimapolitik. Diese Länder bewerten konventionelle Klimapolitik teilweise als eine Bedrohung für ihr wirtschaftliches Wachstum.⁴¹ Gerade für diese Staaten könnte Geoengineering attraktiv werden. Sie könnten durch dessen Einsatz die Folgen des Klimawandels abmildern und somit weiterhin Treibhausgase ausstoßen beziehungsweise langsam reduzieren, ohne damit ihr Wirtschaftswachstum zu gefährden.⁴²

Ob weitere andere ökonomische Kosten auftreten und ob etwa China die eventuell sehr hohen politischen Kosten für einen Einsatz tragen kann und will, ist vor dem Hintergrund der heutigen chinesischen Klimapolitik nicht absehbar.⁴³ Allein die unsichere Einschätzung in diesem einzelnen Fall zeigt, dass die vorangegangene Argumentation nur mögliche Interessenstrukturen verdeutlicht. Daher wird nicht der Anspruch erhoben, die Einstellung einzelner Länder zum Thema Geoengineering prognostizieren zu wollen. Dies wäre in der kurzen, hier dargelegten Form auch eine nicht angemessene Vereinfachung.

Neben den eben dargestellten Faktoren spielen auch Normen, Werte und kulturelle Vorstellungen („Risikokulturen“) unterschiedlicher Länder eine große Rolle. Diese sind für die gesellschaftliche Wahrnehmung und Einstellung zu Geoengineering von hoher Bedeutung.⁴⁴ Dies bedeutet zugleich, dass eine international geteilte Einschätzung des Themas kaum möglich sein wird. Einstellungen können sich, besonders hinsichtlich der Einschätzung des Risikos ungewollter und nicht absehbarer Nebenfolgen, stark unterscheiden. Hierdurch kann es zu inner- aber ebenso zu zwischenstaatlichen Kontroversen kommen, die Konfliktpotenzial bergen.⁴⁵

Europa zeichnet sich durch eine zunehmend kritische Perspektive gegenüber Technologien im Allgemeinen und gegenüber Geoengineering im Besonderen aus.⁴⁶ Für Europa erscheint es wahrscheinlich, dass,

neben seiner bereits heute klaren Positionierung für konventionelle Klimapolitik, auch ein hohes kulturell bedingtes Potenzial zur Mobilisierung gegen einen Einsatz entstehen könnte.⁴⁷

Laut Bevölkerungsumfragen in den Vereinigten Staaten von Amerika scheint generell Skepsis gegenüber Geoengineering vorzuherrschen.⁴⁸ Allerdings ist dabei einschränkend hervorzuheben, dass nur geringe Kenntnisse über dieses Thema in der amerikanischen Bevölkerung vorhanden sind.⁴⁹ Gleichzeitig wird es von einigen amerikanischen *Think Tanks* bereits heute als Handlungsoption propagiert.⁵⁰ Auch ein Großteil der heutigen Forschung findet – neben Großbritannien – in den Vereinigten Staaten von Amerika statt und wird dort zu erheblichen Teilen von privaten Akteuren betrieben.⁵¹ Jenseits der eben dargelegten amerikanischen Bevölkerungsumfragen liegen derzeit jedoch keine Bevölkerungsumfragen vor.⁵²

Zu erwarten ist, dass Länder und Regionen mit weniger technologiekritischen „Risikokulturen“ Geoengineering zukünftig positiver gegenüber stehen, als etwa das kritische Europa. Zusätzlich könnten sich öffentliche Meinungsbilder, bei drastischen Folgen des Klimawandels in betroffenen Ländern, zu dessen Gunsten wandeln. Dies gilt insbesondere dann, wenn die negativen Klimafolgen zu einem sicherheitsrelevanten Phänomen von hohem nationalem Interesse aufgebaut werden würden. Unter diesen Bedingungen wäre ein Einsatz, trotz der Nebenfolgen, nicht auszuschließen.

6. Was bedeutet ein Einsatz von Geoengineering für die Sicherheit von Staaten?

Im Folgenden werden die außen- und sicherheitspolitischen Implikationen von Geo-

engineering dargestellt. Als Erstes werden bei einem Einsatz möglicherweise auftretende Konfliktmöglichkeiten zwischen Staaten dargelegt. Anschließend wird auf die Gefahr bei einem Einsatz durch nicht-staatliche Akteure hingewiesen. Im Anschluss wird auf Folgeprobleme bei einem Einsatz verwiesen. Dies umfasst die zuvor angesprochene *Dual-Use* Problematik und den Schutz kritischer Infrastrukturen.

Konflikte um den Einsatz von Geoengineering

Staaten oder Staatenkoalitionen, welche Geoengineering einsetzen wollen und können, könnten in Konflikt mit dessen Gegnern geraten. Dies könnten andere Staaten und Koalitionen sein, welche von den negativen Nebenfolgen, nicht aber durch den Klimawandel, betroffen wären. Während für die erste Gruppe elementar nationale Interessen durch die Folgen des Klimawandels bedroht sein könnten, würde sich die zweite Gruppe durch die potenziell globalen und existenziellen Nebenfolgen bedroht fühlen.

Falls der Konflikt nicht durch Verhandlungen friedlich beigelegt werden könnte, ist ein breites Spektrum an Austragungsmöglichkeiten denkbar. Dies beginnt mit einem Rüstungswettlauf und der Entwicklung von weiteren Geoengineering Maßnahmen und Gegenmaßnahmen, um erstgenannte wirkungslos werden zu lassen. Eine gewaltsame Eskalation erscheint ebenso möglich. Militärische Kräfte könnten einerseits in einem solchen Umfeld die nötige Infrastruktur für einen Einsatz von Geoengineering stellen oder zivil genutzte Infrastruktur schützen.⁵³ Gegner könnten militärische Mittel einsetzen, um den Einsatz zu verhindern oder zu unterbinden.

Diese Konflikte müssen nicht zwangsweise nur zwischen Staaten stattfinden, sondern könnten auch nicht-staatliche Gruppen einbeziehen. Radikalisierte NGOs oder *Green*

Warriors könnten, selbst bei einem internationalen Konsens für einen Einsatz, versuchen, diesen vorab zu unterbinden, während des Betriebes zu stören oder auch zu sabotieren. Durch die bereits heute starke Involvierung des privaten Forschungssektors und der Möglichkeit eines zukünftigen nur profitorientierten „Geoengineering-Unternehmertums“,⁵⁴ ist ein solches Konfliktbild auch zwischen Unternehmen und NGO möglich.

Konflikte bei der Koordinierung und der Kostenverteilung von Geoengineering Maßnahmen

Ein weiteres mögliches Konfliktpotenzial zwischen Akteuren ergibt sich aus den Fragen, wie ein Einsatz koordiniert werden könnte und wer die Kosten sowie Verantwortung dafür tragen würde. Möglich wären etwa Konflikte um das genaue „Zielklima“ und darum, wer dieses bestimmen sollte. Ein solcher Interessengegensatz könnte zwar bis auf das Niveau einer gewaltsamen Austragung eskalieren, dies erscheint aber eher unwahrscheinlich. Wahrscheinlicher ist, dass aufgrund eines fehlenden Kompromisses, Akteure Geoengineering einseitig zum Einsatz bringen. Die Gegenseite könnte, wenn sie befürchtet stark von Nebenfolgen betroffen zu sein, diesen Einsatz dann ablehnen. Andererseits könnten auch beide Akteure, wenn sie ein hohes Interesse an der Abmilderung der Folgen des Klimawandels haben, unkoordiniert voneinander einen Einsatz betreiben. Dies könnte die Gefahr von Nebenfolgen nochmals deutlich erhöhen.

Konflikte infolge katastrophaler Nebenfolgen

Es ist auch denkbar, dass zunächst ein internationaler Konsens für den Einsatz von Geoengineering besteht, dieser jedoch auf-

grund des Eintritts massiver Nebenfolgen für eine Region zerbricht. Simulationsmodelle zeigen beispielsweise häufig eine massive Veränderung der regionalen Niederschlagsverteilung als eine mögliche Nebenfolge auf. Durch verringerte Niederschlagsmengen könnten Ernteausfälle und Frischwasserknappheit entstehen und so das nationale Interesse von Staaten elementar berühren. Folglich könnte eine Eskalationsdynamik, wie im ersten Fall, entstehen. Andererseits könnten durch Nebenfolgen weitere, zusätzliche Stressfaktoren für schwache und fragile Staaten verursacht werden. Hierdurch könnten Destabilisierungsdynamiken ähnlich wie bei einem fortschreitenden Klimawandel entstehen.⁵⁵

Neue Gefahr – Der Retter der Welt

Jenseits der bisherigen Darstellung könnten auch nicht-staatliche Akteure möglicherweise Geoengineering einsetzen. Ein radikalisierte und finanzstarker Akteur könnte sich als „Retter der Welt“ verstehen und mit der Einbringung von Partikeln in die Stratosphäre einen massiven SRM-Einsatz durchführen. Hierzu benötigt er eine entsprechende Infrastruktur, um Partikel in die Stratosphäre einbringen zu können. Entgegen anderen SRM-Maßnahmen, die ständig betrieben werden müssen, könnte dies, aufgrund der langen Verweildauer von Partikeln in der Stratosphäre, eine globale und andauernde Maßnahme darstellen. Ein solcher privater Einsatz könnte durch Staaten nur schwer unterbunden werden. Auch diese Konstellation stellt durch potenziell entstehende Nebenfolgen ein Risiko für das nationale Interesse von Staaten dar.

Dual-Use und Klimawaffen

Abschließend ist auch die Gefahr eines Einsatzes von Technologien des Geoengi-

neering im Sinne einer militärischen Nutzung zumindest nicht völlig unwahrscheinlich. Dieses Argument findet sich teils auch in kritischen Stellungnahmen wieder.⁵⁶ Dort wird dann auf eine bereits heute personelle Involvement des industriell-militärischen Komplexes verwiesen und das historische Interesse des Militärs seit den 1960er Jahren an der Möglichkeit von Wettermodifikationen aufgezeigt. Die gezielte Manipulation lokaler Wetterereignisse wird als Wettermodifikation bezeichnet, dies ist jedoch kein Geoengineering. Details zu diesem Thema zeigt die Box Wettermodifikationen auf. Eine militärische Manipulation des globalen Klimas oder Nutzung der Technologien hierfür erscheint höchst unwahrscheinlich. Denn erstens bestünde das Problem, dass sich Maßnahmen kaum regional und lokal begrenzen und auch kaum vorstellbar gezielt steuern lassen werden. Zweitens wären die politischen Kosten bei einer militärischen Klimaveränderung und der gesellschaftliche Protest extrem hoch. Drittens wäre ein solcher Einsatz auch völkerrechtlich verboten. Eine gezielte militärische Anwendung durch Staaten ist daher wenig wahrscheinlich. Wahrscheinlicher wäre eher ein Einsatz durch irrationale nicht-staatliche Kräfte. Eine Proliferation in solche Hände ist vor dem Hintergrund des teils geforderten freien Zugangs zu Informationen und Patenten plausibel.

Wettermodifikation – „Alle tun etwas gegen das Wetter, nur keiner redet darüber.“

Unabhängig vom Geoengineering gibt es noch die Möglichkeit der Wettermodifikation (*Weather Modification*).⁵⁷ Dies bezeichnet die gezielte Beeinflussung lokaler und zeitlich begrenzter Wetterphänomene.⁵⁸ Dieser Bereich umfasst die Beeinflussung von Wolken, Niederschlagsmengen sowie von Sturmphänomenen. Wettermodifikation könnte in der internationalen Klimapolitik als Adaptionsmaßnahme gegenüber extremen Sturmphänomenen, z.B. durch deren Umleitung, oder gegenüber Dürren, durch die Erhöhung der regionalen Niederschlagsverteilung, eingeordnet werden.⁵⁹ Folglich könnten auch solche Maßnahmen bei einem fortschreitenden Klimawandel an Bedeutung gewinnen, wobei hier noch ein hoher Bedarf an weiterführender Forschung bestünde.⁶⁰ Wettermodifikation wird bereits heute nahezu flächendeckend auf der Welt eingesetzt, auch wenn dessen Wirksamkeit umstritten ist.⁶¹ Die Programme zur Wettermodifikation und dessen weiterführende Erforschung werden heute vorwiegend in China und den USA betrieben.⁶² Die Intentionen für eine Anwendung können äußerst vielfältig sein und umfassen heutzutage ökonomische (Niederschlagserhöhung in der Landwirtschaft) wie auch politisch-symbolische Zwecke (Anwendung durch China bei den Olympischen Sommerspielen 2009). In der Vergangenheit ist dieser Bereich auch stark militärisch geprägt gewesen. So ist Wettermodifikation in militärischen Operationen während des Vietnamkrieges zur Störung der Bewegung des Feindes (Ho Chi Minh-Pfad) eingesetzt worden.⁶³ Aufgrund der auch beim Militär stark umstrittenen Wirksamkeit, einem völkerrechtlichen Verbot über den *ENMOD*-Vertrag und in Folge starken gesellschaftlichen Drucks sind diese Programme zum *Weather Warfare* eingestellt worden. In den 1990er Jahren finden sich jedoch weiterführende Gedankenexperimente hierzu seitens der US-Streitkräfte.⁶⁴

Zukünftig könnte bei einer steigenden Verschärfung der Folgen des Klimawandels die Wettermodifikation an Bedeutung gewinnen und häufiger sowie großflächig koordinierter zum Einsatz kommen, etwa aus humanitären Gründen. Beispielsweise könnte versucht werden, bei der Umlenkung von Sturmphänomenen zu manipulieren oder in Zonen mit extrem geringen Niederschlagsmengen diese zu verändern. Auch dieser Bereich führt zu möglichem Konfliktpotenzial zwischen Staaten – ebenso wie bei Geoengineering – aufgrund grenzüberschreitender Folgen, z.B. bei einer fehlgeleiteten Beeinflussung von Sturmphänomenen. Ebenso sind Technologien zur Wettermodifikation – auch wenn es völkerrechtlich verboten ist – potenziell durch feindliche Kräfte nutzbar und die Entwicklungen sollten daher weiter beobachtet werden.

Fazit

Damit Mark Twains Satz sich in der Zukunft nicht ins Gegenteil verkehrt – „Alle machen etwas gegen das Wetter (Klima) und keiner redet darüber“ – ist eine zeitnahe politische Regulierung des Phänomens unter möglichst weitreichender Einbeziehung aller relevanten Akteure unabdingbar. Ansonsten könnte Geoengineering in Zukunft zu einem bedeutsamen Konfliktgegenstand der internationalen Politik werden.

Grenzüberschreitende Probleme, wie sie etwa durch den Einsatz von SRM-Maßnahmen entstehen können, müssen nicht

zwangsläufig in eskalierenden Konflikten enden. Diese Art von Problemen liefern immer auch Anreize und Chancen für Kooperationen und Regulierung.⁵⁷ Gewaltsame Konflikte sind somit keinen zwanghaften Dynamiken unterworfen, sondern immer Ergebnis konkreter Politik und deren Scheitern.

Für Deutschland ist diese Thematik brisant, insbesondere vor dem Hintergrund seiner derzeitigen Klimapolitik und dem starken Fokus auf Emissionsreduzierungen. Erstens, wäre ein Einsatz von Geoengineering aufgrund der möglichen Nebenfolgen als äußerst kritisch zu beurteilen. Zweitens, würde ein eventueller Wandel, weg von dem Ziel einer insgesamt postfossilen Trans-

formation von Wirtschaft und Gesellschaft zu einem neuen Paradigma – der Nutzung von Technologien anstatt Emissionsreduzierung um gegen den Klimawandel anzugehen - den heutigen klimapolitischen Zielen und nationalen Interessen Deutschlands widersprechen.

Damit ist Geoengineering primär ein strategisch bedeutsames außenpolitisches Gestaltungsfeld. Die Bundeswehr sollte jedoch – nicht zuletzt aufgrund der *Dual-Use* Problematik – aufbauend auf diesem Future Topic, den Studien des Bundesministeriums für Bildung und Forschung und des Umweltbundesamtes, eine eigene Position zum Thema Geoengineering entwickeln.

Besonders wichtig ist dabei die Beobachtung der Geoengineering Politik von Staaten wie den USA, China, Indien und Russland. Langfristig ist ein möglicher Streitkräfteeinsatz in der Welt bei einem Konfliktfall nicht auszuschließen. Auch der Schutz von Infrastrukturen oder die Bereitstellung militärischer Infrastruktur für den Einsatz von SRM-Maßnahmen erscheinen möglich. Daher sollte die Bundeswehr insbesondere die gesellschaftlichen Diskurse der stark vom Klimawandel verwundbaren Länder und den Emittenten mit geringem Interesse an einer Transformation zu einer postfossilen Gesellschaft weiter beobachten. Weiterhin sind aber auch allgemein die technologischen Weiterentwicklungen und völkerrechtlichen Rahmenbedingungen gezielt zu beobachten, um mögliche Gefahren zu antizipieren und sich mittelfristig auf solche vorbereiten zu können.

Der akute Handlungsbedarf für die Bundeswehr ist als eher gering einzuschätzen. Da Geoengineering jedoch eine Thematik von zukünftig strategischer Bedeutung werden kann, sollte die Bundeswehr sich hierzu positionieren und ein Monitoring relevanter technologischer, gesellschaftlicher und rechtlicher Entwicklungen vornehmen.

Endnoten

- ¹ Die Einleitung lehnt sich in Teilen an ein Szenario von Schwägerl/Rinke (2012) an.
- ² Für einen Überblick über die Geschichte von Wettermodifikation und dem daraus entstandenen Geoengineering siehe Fleming (2007) und Keith (2000).
- ³ Siehe für die Definition Rickels et al. (2011: 9). Für eine weitere Darstellung der Diskussion um die Definition von Geoengineering siehe *Action Group on Erosion, Technology and Concentration* (ETC Group) (2010a: 4f.) und eine Stellungnahme der Heinrich Böll Stiftung (Kössler 2012: 11f.).
- ⁴ Siehe hierzu Rickels et al. (2011: 9f.) und Umweltbundesamt (2011: 9).
- ⁵ Siehe hierzu Crutzen (2006), Keith et al. (2010: 2), Bickel/Lane (2009) und für einen Überblick Robock (2009: 7), Zürn (2011: 13-15). Für eine kritische Auseinandersetzung mit der Effizienz-These und einer Darstellung unterschlagener Kostenfaktoren siehe Rickels et al. (2011: 57-76) und Robock (2009).
- ⁶ Siehe hierzu Umweltbundesamt (2012: 17, 31), Rickels et al. (2011: 1-8), *United States Government Accountability Office* (US-GAO) (2011: V-VIII), *Royal Society* (2009: X-XI) und *United Nations Environmental Programme - Convention on Biodiversity* (UNEP-CBD) (2012: 79-81). Für einen konkreten Überblick weiter benötigter Forschung siehe Gordon (2010: 7f.), Rickels et al. (2011: 55f.), US-GAO (2011:42-47).
- ⁷ Siehe hierzu *ETC-Group* (2010a) und für die *Oxford Principles* Rayner et al. (2009).
- ⁸ Siehe hierzu Zentrum für Transformation der Bundeswehr (2011).
- ⁹ Siehe für eine Übersicht über die Entwicklung der Emissionen *Netherlands Environmental Assessment Agency* (2012) und für einen Überblick über die Interessen entscheidender Akteure der internationalen Klimapolitik Sterck (2010) und Dröge (2012).
- ¹⁰ Siehe hierzu Keith (2000: 248), Rickels et al. (2012: 9f.). Weiterhin wird für einen Einsatz von Geoengineering argumentiert, dass ein Wandel hin zu einer postfossilen Gesellschaft so tiefgreifende Veränderungen des Alltags (Konsummuster) nach sich zieht, dass dies nur langfristig möglich ist, im Gegensatz hierzu könnte Geoengineering jedoch wesentlich leichter und schneller umzusetzen sein (Betz/Cacean 2012: 37f.).
- ¹¹ So verweisen Befürworter auf die hohe Effizienz speziell von SRM-Maßnahmen im Vergleich zu konventionellen Klimamaßnahmen und räumen diesen daher einen Vorrang ein (Bickel/Lane 2009). Die Bundesregierung hat hingegen bereits klar herausgestellt, dass sie den derzeitigen Primat von Emissionsreduzierung beibehalten wird (Bundesregierung 2012).
- ¹² Siehe hierzu Crutzen (2006), Keith et al. (2010).
- ¹³ Siehe hierzu z.B. Crutzen (2006), Barrett (2007), Bickel/Lane (2009), Keith et al. (2010: 2) und für einen Überblick Zürn (2011: 13-15).
- ¹⁴ Siehe hierzu Swart/Marinova (2010), Victor et al. (2009). In diesem Falle wären nach Aussagen der Befürworter die später dargelegten Nebenfolgen eines Einsatzes das geringere Übel. Vielmehr besteht heute schon die moralische Pflicht für eine weitere Erforschung dieser Option. Siehe hierzu Ott (2010: 36) und Betz/Cacean (2012: 29-37).
- ¹⁵ Siehe hierzu Schelling (1996), Virgoe (2009: 107), Victor et al. (2009). Für eine kritische Auseinandersetzung mit dieser These siehe Horton (2011). Dieser betont wie hoch in dem Falle von Geoengineering die Anreize für Kooperationen und eine Regulierung sind.
- ¹⁶ Siehe hierzu Schelling (1996: 305).

- ¹⁷ Siehe hierzu Bundesregierung (2012).
- ¹⁸ So würden SRM-Maßnahmen eine Veränderung des atmosphärischen Wasserkreislaufs nach sich ziehen (Rickels et al. 2011: 42f.). In einer weiterführenden Studie zeigte Schmidt et al. (2012) anhand von Klimamodellen, dass eine Abkühlung auf ein vorindustrielles Niveau der global gemittelten Temperatur die Niederschlagsmengen etwa in Amerika (bis zu 20%) und Europa (15%) massiv verringert werden würden.
- ¹⁹ Siehe hierzu zum Beispiel Robock (2008: 15f.), UNEP-CBD (2012a), Schmidt et al. (2012).
- ²⁰ Siehe hierzu Robock (2012).
- ²¹ Siehe hierzu Winter (2012: 279).
- ²² Siehe hierzu Rickels et al. (2011: 27, 32-35).
- ²³ Siehe hierzu *ETC-Group* (2009: 34, 2010b). Gleichzeitig gilt es zu beachten, dass Geoengineering gerade für die vom Klimawandel am stärksten betroffenen Akteure in der Region Sub-Sahara Afrika keine verfügbare Option ist. Daher wird kritisiert, dass Geoengineering nur eine Verlängerung des ausbeuterischen Wachstumsmodells der Industrieländer darstellt. Im Gegenzug hierzu sieht etwa Victor et al. (2009) als Befürworter die führenden Industrienationen gar in der Pflicht, das Thema ohne „blockierende“ Staaten des Südens voranzutreiben und Geoengineering einzusetzen.
- ²⁴ Dies bedeutet bei SRM-Technologien einen dauerhaften Betrieb der Maßnahmen zur Abkühlung der globalen Temperatur, bei CDR-Maßnahmen eine dauerhafte Extraktion und Speicherung des CO₂.
- ²⁵ Siehe hierzu Ross/Matthews (2009). Außerdem zeigt eine Studie, dass etwa SRM-Technologien bis zu 1000 Jahre betrieben werden müssten, bis mittels natürlicher Prozesse die CO₂ Konzentration sich wieder auf ein vorindustrielles Niveau absenkt (Siehe hierzu Rickels et al. 2011: 43).
- ²⁶ Siehe hierzu Ott (2010: 37), Rickels et al. (2011: 35, 70f.).
- ²⁷ Siehe hierzu Proeßl/Güßow (2011: IV).
- ²⁸ Siehe hierzu Proeßl/Güßow (2011).
- ²⁹ ENMOD ist die Abkürzung für *Convention on the Prohibition of Military or Any Other Hostile Use of Environmental Modification Techniques*.
- ³⁰ Siehe hierzu Proeßl/Güßow (2011), Wiertz/Reichwein (2011), Winter (2012).
- ³¹ So wird technologiespezifisch bei einer Ozeandüngung als CDR-Maßnahme der Seerechtsvertrag tangiert, bei dem Einbringen von Reflektoren in das All der Weltraumvertrag. Siehe hierzu Proeßl/Güßow (2011: 13-24, 39-48), Wiertz/Reichwein (2011) und Winter (2012).
- ³² So wird etwa als eine mögliche Nebenfolge der Einbringung von Schwefelpartikeln in die Stratosphäre, damit gerechnet, dass diese die Ozonschicht angreifen würden (siehe hierzu Überblicksdokument im Anhang).
- ³³ In der Literatur werden lediglich die Governancestrukturen für einen Einsatz augenscheinlich kaum jedoch für die Errichtung eines Verbots diskutiert. Siehe hierzu z.B. Virgoe (2009).
- ³⁴ Siehe hierzu UNEP-CBD (2012b).
- ³⁵ Siehe hierzu IPCC (2011), Wiertz/Reichwein (2011: 17).
- ³⁶ Siehe hierzu Renn et al. (2011: 9), Wiertz (2011: 8-10).
- ³⁷ Siehe hierzu Wheeler (2011), *Center for Global Development* (2012).
- ³⁸ Siehe hierzu Zentrum für Transformation der Bundeswehr (2011).
- ³⁹ Siehe hierzu *Center for Global Development* (2012).

- ⁴⁰ Siehe hierzu Mildner/Richert (2010: 43).
- ⁴¹ Siehe hierzu Dröge (2010).
- ⁴² Siehe hierzu Dröge (2011).
- ⁴³ Siehe hierzu Wacker (2009).
- ⁴⁴ Siehe hierzu Corner/Pidgeon (2010: 28f.), Rickels et al. (2011: 77f.). Erst in dem gesellschaftlichen Prozess wird definiert, was bedroht ist, durch was es bedroht wird, wie stark diese Bedrohung ist und welche Mittel adäquat sind, um diese Bedrohung abzuweisen. Siehe hierzu Buzan/Weaver/Wilde (1997), MacDonald (2008) und Daase (2011).
- ⁴⁵ Corner/Pidgeon (2010: 28f.), Rickels et al. (2011: 86-88), Maas (2012). Allerdings sind auch materielle Faktoren wie der Wohlstand zu beachten (Renn et al. 2011: 9).
- ⁴⁶ Siehe hierzu Beck (2007), Scheer/Renn (2010). Auch klein-skalige bereits durchgeführte Experimente sind in Deutschland stark kritisiert worden (Renn et al. 2011: 4).
- ⁴⁷ Siehe hierzu Rickels et al. (2011: 91).
- ⁴⁸ Siehe hierzu Borick/Rabe (2012).
- ⁴⁹ Siehe hierzu Renn et al. (2011: 86).
- ⁵⁰ Siehe hierzu Lane (2011).
- ⁵¹ Siehe hierzu *ETC-Group* (2010: 36).
- ⁵² Für das weitere thematische Monitoring zu beachten, wären etwa: politische Erklärungen wie die der Bundesregierung, mögliche Testläufe und damit verbundener Protest, aber auch das zukünftige Verhalten in Klimaverhandlungen.
- ⁵³ Bereits Crutzen (2006) etwa schlägt vor, bei der Einbringung von Partikeln in die Stratosphäre militärische Infrastruktur zu nutzen.
- ⁵⁴ Siehe hierzu Bracmort/Lattanzio/Barbour (2011: 5) und Kössler (2012: 37-39).
- ⁵⁵ Siehe hierzu Zentrum für Transformation der Bundeswehr (2011).
- ⁵⁶ Siehe hierzu *ETC-Group* (2011) und Kössler (2012).
- ⁵⁷ Siehe hierzu Horton (2011).
- ⁵⁸ Trotz der Unterschiede sind die beiden Aspekte, nicht voneinander völlig isoliert zu betrachten. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Idee des *Climate Engineering* historisch im Bereich der Wetterbeeinflussung verwurzelt ist (siehe hierzu Fleming 2007) und Ansätze der Wettermodifikation aus dem Bereich des *Cloud Seeding* potenziell groß-skalig als Dual-Use Technologie dem *Geoengineering* dienen könnten.
- ⁵⁹ Siehe hierzu Coble (1997: 4).
- ⁶⁰ Siehe hierzu Cooper/Jolly (1969: 10f.), *National Research Council* (2004) und *World Meteorological Organization* (WMO) (2007).
- ⁶¹ Siehe hierzu *National Research Council* (2004: 4) und WMO (2007).
- ⁶² Siehe hierzu WMO (2007) und *ETC-Group* (2012).
- ⁶³ Siehe hierzu *ETC-Group* (2010: 21).
- ⁶⁴ Siehe hierzu Keith (2000: 252-253), Fleming (2007) und Lohbeck (2004: 19).
- ⁶⁵ Es existieren zwar im amerikanischen Raum durchaus Studien aus den 1990er Jahren, welche sich mit der militärischen Einsetzbarkeit solcher Technologien beschäftigen (Coble 1996; House et al. 1996; Lohbeck 2004: 27-31), allerdings sind solche Anwendungen völkerrechtlich verboten. Außerdem stellen diese auch eher Denkeexperimente dar.

Anlage 1: Forschungsstand zu Methoden des Geoengineerings

In der Wissenschaft werden grundsätzlich zwei Hauptmethoden zur Beeinflussung des Klimawandels unterschieden:

1. Methoden zur Beeinflussung des Strahlungshaushaltes der Erde (*Solar Radiation Management* – SRM).
2. Methoden zur Reduzierung der Kohlendioxidkonzentration (*Carbon Dioxide Removal* – CDR)

Das Ziel beider Methoden ist die Verminderung der Auswirkungen des Klimawandels insbesondere die Reduzierung der globalen Durchschnittstemperatur. Sie unterscheiden sich jedoch grundlegend in der Wirkungsweise, dem Zeitraum der Effektivität, den Effekten auf die Durchschnittstemperatur und den Konsequenzen für die Umwelt. Beiden gemein ist, dass sie nicht auf die Ursachen des Klimawandels einwirken, sondern nur die Folgen bekämpfen können.

1. SRM-Methoden

SRM-Technologien zielen darauf ab, den Strahlungshaushalt der Erde zu beeinflussen. Dazu wird zum einen versucht die Albedo der Erde zu erhöhen. Die Albedo¹ ist das Maß für die Fähigkeit einer Oberfläche Strahlung zurück zu strahlen. Ein hoher Albedo Wert zeigt eine hohe Rückstrahlungsfähigkeit an. Zum anderen gibt es Ansätze durch

technische Anlagen im Weltall Sonnenstrahlung am Erreichen der Erde zu hindern.

Änderungen der Oberflächenalbedo auf der Erde²

a. Urbane/besiedelte Gebiete

Eine sehr einfache und sofort umzusetzende Methode wäre das Weißen von Dächern und Aufhellen von menschlichen Ansiedlungen. Es wäre kein größerer Eingriff in die Natur und würde zusätzlich für Energieeinsparungen (Klimaanlagen) sorgen. Zur Aufrechterhaltung der Wirksamkeit wäre eine regelmäßige Reinigung bzw. Erneuerung nötig.

b. Flora

Wie künstliche Oberflächen unterscheiden sich auch Pflanzen in ihrer Albedo. Durch den Anbau bzw. Austausch hin zu mehr reflektierenden Feldfrüchten und Grünlandsorten könnte die Landwirtschaft einen Beitrag zur Vergrößerung der Abstrahlung leisten. Dieses sehr große und langsam umzusetzende Projekt würde einen großen Eingriff in die Natur darstellen, vor allem wenn auch nicht genutzte oder nur extensiv genutzte Flächen einbezogen würden.

c. Wüsten

Zur Erhöhung der Albedo von Wüstengebieten könnten große Flächen mit reflek-

¹ Ein Albedo Wert gleich null entspricht totaler Absorption. Ein Albedo Wert gleich eins entspricht vollständiger Reflektion des Lichtes.

² Die Veränderungen von Oberflächeneigenschaften von Gebäuden, natürlichen Oberflächen, Landschaften oder Meeresoberflächen, um eine größere Menge an Strahlung in das Weltall zu reflektieren.

tierendem Material bedeckt werden. Die großflächige vollständige Bedeckung wäre ein großer Eingriff in das Ökosystem, aber auch in das Klimasystem. Durch die extremen Klimaverhältnisse in Wüstenregionen würde diese technisch aufwendige Methode eine intensive Wartung erfordern.

d. Meeresoberfläche

Die Erhöhung der Albedo der Ozeane soll mit Hilfe von schwimmenden reflektierenden Kissen erreicht werden. Bei dieser sehr aufwendigen Technologie wären für messbare Effekte sehr große bedeckte Flächen nötig. Diese Bedeckung hätte Auswirkungen auf marine aber auch terrestrische Ökosysteme. Die extremen Umweltbedingungen auf dem Meer würden ständige und intensive Wartungen erfordern.

Änderungen der Albedo im Luftraum

a. Marine Wolkenbildung

Die Erhöhung der Albedo von Wolken soll durch die Ausbringung von zusätzlichen Kondensationskeimen in der Troposphäre über marinen Gebieten erreicht werden. Die Kondensationskeime in Form von kleinsten Salzkristallen sollen mittels Schiffen oder Flugzeugen direkt in die Luftschichten über Ozeanen gesprüht werden. Da Wolken räumlich unregelmäßig verteilt sind und eine geringe Lebensdauer aufweisen, müsste die Freisetzung in ausreichenden Mengen und kontinuierlich erfolgen. Die Methode hätte einen Einfluss auf lokale bis regionale Wetter- und Strömungsmuster.

b. Stratosphärenbeeinflussung

Beeinflussung der Albedo der Stratosphäre wäre durch zwei unterschiedliche Ansätze denkbar. Zum einen könnten reflektierende Kleinobjekte wie Aluschnipsel oder Kleinstballons zum Einsatz gebracht werden. Das Absinken in die Troposphäre wäre eine Gefahr für den Flugverkehr, die Indus-

trie und die Umwelt. Es wäre ebenso möglich Chemikalien wie Schwefelverbindungen als Aerosole in der Stratosphäre zu verteilen. Dort könnten sie neben der Erhöhung der Albedo aber auch mit der Ozonschicht wechselwirken. Beim Absinken der Aerosole in die Troposphäre wäre eine Beeinflussung globaler Wetterphänomene zu erwarten.

Änderungen der Albedo im Weltraum

c. Installationen im erdnahen Weltraum

Durch die Installationen von sehr vielen kleinen spiegelnden Scheiben oder die Ausbringung von Staubpartikeln, zur Ausbildung eines Staubringes in einer erdnahen Umlaufbahn soll die Menge der Sonnenstrahlen die die Erde erreichen reduziert werden.

d. Installationen im erdfernen Weltraum

Auf dem Mond oder auf Positionen zwischen der Sonne und der Erde stationierte Riesenspiegel oder lichtstreuende Netzwerke aus Aluminium könnten ebenfalls die Menge an einstrahlendem Sonnenlicht auf der Erde reduzieren.

Die Änderung der solaren Einstrahlung wäre global jedoch nicht gleichmäßig verteilt. Welche Auswirkungen dies auf die atmosphärische und ozeanische Zirkulation hat ist unklar. Auch ungeklärt ist inwieweit sich die Methode von der Erde aus beeinflussen lässt (Steuerung, Umkehrbarkeit). Vor allem erdnahe Umlaufbahnen würden das Sicherheitsrisiko im Weltraum erhöhen.

Gesamteinschätzung der SRM-Methoden

Allen Methoden ist gemein, dass sie keinen Einfluss auf den Ausstoß von Treibhausgasen ausüben. Sie wirken also nicht gegen die Ursachen des Klimawandels sondern nur gegen die Folgen. Bei erfolgreicher Anwen-

derung wäre eine dauerhafte Anwendung nötig, da bei Anwendungsabbruch mit einem abrupten Temperaturanstieg zu rechnen wäre. Viele Methoden sind allerdings praktisch noch nicht erprobt und existieren nur als theoretische Vorschläge oder sind noch im Experimentalstadium auf Laborebene. Daher können Wirksamkeit, Nebenwirkungen und Risiko vor allem für die großflächige, oft globale Anwendung, noch nicht aus-

reichend abgeschätzt werden. Vor diesem Hintergrund ist besonders bedeutsam, dass viele Methoden Eingriffe in Ökosysteme, globale Luft- und Ozeanzirkulationssysteme darstellen, deren Zusammenspiel heute noch nicht vollständig aufgeklärt ist. Bei den meisten Methoden ist zu erwarten, dass der Aufwand in keinem angemessenen Verhältnis zur erzielten Wirkung steht.

Tabelle 1: SRM-Technologien (Tabelle wird auf der nächsten Seite fortgesetzt).

Technologie	Forschungsstand ³	Potenzielle Effektivität ⁴	Kostenfaktoren ⁵	Potenzielle Konsequenzen ⁶
Änderungen der Oberflächenalbedo auf der Erde <ul style="list-style-type: none"> • Urbane/besiedelte Gebiete • Flora • Wüsten • Meeresoberfläche 	Niedrig (bis zu TRL 2) <ul style="list-style-type: none"> • Grundlegende Funktionsweise erforscht und publiziert • Für einige Technologien für z.B. Wüsten Systemkonzept veröffentlicht, aber fehlende Wirksamkeitsdemonstration 	Hohe Varianz der potenziellen Effektivität von 0,21 % (urbane/besiedelte Gebiete) bis zu mehr als 57 % (Wüsten) <ul style="list-style-type: none"> • Unklar inwieweit sich die Reflexionseigenschaften der Materialien besonders der natürlichen über lange Zeit verändern. • Besonders im Bereich Flora fehlen ausreichende wissenschaftliche Studien zum Reflexionsverhalten. 	Kostenfaktoren: <ul style="list-style-type: none"> • Entwicklung, Herstellung, Testung und Kauf von reflektierenden Materialien oder Pflanzen • Installation, Infrastruktur, Instandsetzung und Entsorgung Kosten: <ul style="list-style-type: none"> • Kostenangaben pro Jahr variieren von 78 Milliarden US-Dollar (USD) für den Einsatz in Urbanen und besiedelten Gebieten bis 3 Billionen USD für den Einsatz in Wüstengebieten 	<ul style="list-style-type: none"> • Urbane/besiedelte Gebiete: Evtl. keine Auswirkungen auf globale Durchschnittstemperatur, aber zusätzliche Energieeinsparung (Klimaanlagen), • Flora: Evtl. keine Auswirkungen auf globale Durchschnittstemperatur, aber lokale Absenkung der Sommertemperaturen • Wüsten: Beeinflussung regionaler Wetter und Niederschlagsmuster und globaler Zirkulationssysteme • Meeresoberfläche: Störung des marinen Ökosystems mit Auswirkung auf terrestrische Ökosysteme

Quellen: Royal Society (2009), US-GAO (2011), Umweltbundesamt (2011) und Rickels et al. (2011).

Tabelle 1: SRM Technologien (Tabelle wird auf der nächsten Seite fortgesetzt).

Technologie	Forschungsstand ³	Potenzielle Effektivität ⁴	Kostenfaktoren ⁵	Potenzielle Konsequenzen ⁶
Änderungen der Albedo im Luftraum Marine Wolkenbildung Stratosphärenbeeinflussung	<u>Marine Wolkenbildung:</u> Niedrig (TRL 2) <ul style="list-style-type: none"> • Grundlegende Funktionsweise erforscht und publiziert • Systemkonzept veröffentlicht • Wirksamkeit noch nicht demonstriert <u>Stratosphärenbeeinflussung:</u> Niedrig (TRL 1) <ul style="list-style-type: none"> • Grundlegende Funktionsweise erforscht und publiziert • Bisher kein Systemkonzept veröffentlicht 	Potenziell volle Effektivität <u>Marine Wolkenbildung:</u> <ul style="list-style-type: none"> • Effektivität variiert Modellabhängig • Partikelfreisetzung muss kontinuierlich erfolgen <u>Stratosphärenbeeinflussung:</u> <ul style="list-style-type: none"> • Partikel- oder Aerosolfreisetzung muss kontinuierlich erfolgen 	<u>Kostenfaktoren:</u> <ul style="list-style-type: none"> • Entwicklung, Herstellung, Testung, Anschaffung und Unterhalt von Infrastruktur zur Ausbringung von Partikeln oder Aerosolen • Entwicklung, Herstellung, Testung und Kauf von Partikeln oder Aerosolen <u>Kosten:</u> <u>Marine Wolkenbildung:</u> Für eine Flotte von 1500 Schiffen geht man von folgenden Zahlen aus: 42 Millionen USD für Entwicklung, 47 Millionen USD für die Produktion, 2,3 bis 4,7 Milliarden USD für den Ankauf <u>Stratosphärenbeeinflussung:</u> Für die Ausbringung von Aerosolen schwanken die Zahlen für das erste Jahr zwischen 35 und 65 Milliarden USD und für die Unterhaltskosten der Folgejahre zwischen 13 und 25 Milliarden USD pro Jahr	<u>Marine Wolkenbildung:</u> <ul style="list-style-type: none"> • Einsatz auf bestimmte Gebiete begrenzt, Einsatzort kann rasch adaptiert werden, Methode lässt sich schnell stoppen • Eingriff in lokale Wetter- und Strömungsmuster • Ein großflächiger Versuch hätte bereits globale Auswirkungen, Umweltverträglichkeit abhängig von Partikelart, Ausbringung und Einsatzort <u>Stratosphärenbeeinflussung:</u> <ul style="list-style-type: none"> • Bei Absinken in Troposphäre Gefahr für Flugverkehr, Industrie, Umwelt • Abkühlung abhängig von Größenverteilung der Aerosolpartikel • Auswirkungen auf globale Zirkulationssysteme, Wolkenbildung, Niederschlagsmuster, Reduktion der Ozonschicht, saurer Regen

Tabelle 1: SRM Technologien.

Technologie	Forschungsstand ³	Potenzielle Effektivität ⁴	Kostenfaktoren ⁵	Potenzielle Konsequenzen ⁶
Änderungen der Albedo im Weltraum a. Installationen im erdnahen Weltraum b. Installationen im erdfernen Weltraum	Niedrig (TRL 2) <ul style="list-style-type: none"> • Grundlegende Funktionsweise erforscht und publiziert • Systemkonzept veröffentlicht • Wirksamkeit noch nicht demonstriert 	Potenziell volle Effektivität <ul style="list-style-type: none"> • Beschränkte Lebensdauer von Raumflugkörpern 	<u>Kostenfaktoren:</u> <ul style="list-style-type: none"> • Entwicklung, Herstellung, Testung, Ankauf einer großen Anzahl von reflektierenden oder streuender Raumflugkörper • Transportvehikel für den Start • Infrastruktur und Unterhalt <u>Kosten:</u> <ul style="list-style-type: none"> • Verschiedene Schätzungen gehen von Kosten zwischen 1,3 und 5 Billionen USD aus 	<ul style="list-style-type: none"> • Änderung der solaren Einstrahlung nicht gleichmäßig global verteilt • Auswirkungen auf atmosphärische und ozeanische Zirkulationen mit unkalkulierbaren Folgen • Beeinflussung der Methode unklar (Steuerung, Umkehrbarkeit, Beenden)

Quellen: Royal Society (2009), US-GAO (2011), Umweltbundesamt (2011) und Rickels et al. (2011).

³ Der Forschungsstand in der Tabelle gibt an, inwieweit eine Methode/Technologie entwickelt ist in Bezug ihrer Wirksamkeit gegen den Klimawandel. Der hier verwendete *Technology Readiness Level (TRL)* Wert wurde aus einer Studie des *United States Government Accountability Office* übernommen (US-GAO 2011: 13–42). Der TRL wurde ursprünglich von der NASA entwickelt und gibt auf einer Skala von 1 bis 9 an, inwieweit eine Technologie entwickelt ist (Mankins 1995).

⁴ Die potenzielle Effektivität drückt die mögliche Fähigkeit einer Methode/Technologie dem Klimawandel entgegenzuwirken aus. Als Ausgangswert wird von einer Verdopplung der CO₂ Konzentration gegenüber vorindustriellem Niveau ausgegangen.

⁵ Die Angaben für die Kosten von Geoengineering Maßnahmen variieren stark je nach Herausgeber der wissenschaftlichen Studien. Zur Einordnung der Größenordnungen können die Zahlen für die Ausgaben in Forschung und Entwicklung für herkömmliche Emissionskontrolle (Simulationsergebnisse *World Energy Outlook* für mittelfristige Stabilisierung auf 450 ppm CO₂equiv (IEA 2010) herangezogen werden: 220 Mrd. USD/Jahr (2010–2020); 940 Mrd. USD/Jahr (2020–2035); 1.280 Mrd. USD /Jahr (2030–2035). Außerdem geht man bei herkömmlicher Emissionskontrolle für 2035 von Kosten zwischen 90–120 USD pro eingelagerter Tonne CO₂ aus.

⁶ Berücksichtigen potenzielle Konsequenzen, Risiken und positive Nebenfolgen.

2. CDR-Methoden:

CDR-Methoden zielen darauf, ab die Konzentration des Treibhausgases CO_2 aus der Atmosphäre zu verringern. Dazu wird durch verschiedene Technologien CO_2 gebunden und anschließend zumeist unterirdisch gespeichert. Sie nehmen keinen Einfluss auf die Menge an menschlich produziertem CO_2 .

Abscheidung und Speicherung von CO_2 (CCS-Carbon Capture and Storage)

Bei dieser energieintensiven Technologie wird das Kohlendioxid aus Rauchgas, vornehmlich aus Kohlekraftwerken, abgetrennt und anschließend zur dauerhaften Speicherung in den Untergrund, in geologisch geeignete Schichten, verpresst. Liegen Abscheidungs- und Speicherort räumlich voneinander getrennt, ist zusätzlich eine Transportinfrastruktur nötig. Das Potenzial dieser Technologie ist abhängig von der tatsächlichen Speicherkapazität. Der bisherige Forschungsstand lässt keine verlässlichen Aussagen zu Sicherheit, Aufnahmefähigkeit und Kapazitäten geologischer Schichten zu. Pilotprojekte testen momentan nur den ersten Schritt der Abscheidung von Kohlendioxid. Mit einer kommerziellen Verfügbarkeit ist ab 2025 zu rechnen (WI 2010).

Nutzung von Bioenergie mit Kohlenstoffabscheidung und -speicherung (BE-CCS)

Bei dieser Technologie wird die Erzeugung von Bioenergie mit der oben beschriebenen CCS-Technologie kombiniert. Zur effizienten Nutzung dieser Technik sind große CO_2 -Ströme von Vorteil. Daher wäre sie vor allem für große Bioenergieanlagen, wie Bioethanol-Raffinerien, ideal geeignet.

Abscheidung und Speicherung von CO_2 aus der Umgebungsluft

In der Forschung werden aktuell drei parallele Technologien entwickelt, um CO_2 direkt aus der Umgebungsluft zu filtern. Die anschließende Lagerung würde dann im Untergrund (siehe CCS) oder in der Tiefsee erfolgen. Die Entwicklungen sind im Stadium von Prototypen auf Laborbasis. Diese Technologie wäre ubiquitär einsetzbar, so zum Beispiel in der Nähe von CO_2 Erzeugern (Autobahnen) aber auch in direkter Nähe geeigneter Speicherorte.

Methoden auf Basis von Biokohle und Biomasse

Das Pflanzenwachstum bindet durch die Photosynthese CO_2 in Biomasse. Nach Absterben und Zersetzung der Pflanzen wird das gebundene CO_2 wieder freigesetzt. Verschiedene Methoden versuchen diesen letzten Schritt zu unterbinden, indem sie Biomasse speichern, etwa durch die Verwendung als Baustoffe (zeitlich begrenzt), durch die Umwandlung in Biokohle (Lagerung in Böden oder zur Energiegewinnung) oder durch die direkte luftdichte Einlagerung von Biomasse im Boden oder im Meer. Problematisch wären bei diesen Methoden, der Verlust von wichtigen ebenfalls in der Biomasse gespeicherten Nährstoffen aus dem natürlichen Kreislauf.

Landnutzungsmanagement

Die Einordnung von Landnutzungsmanagement als Geoengineering Maßnahme ist umstritten. Durch verschiedene Maßnahmen in der Forst- und Landwirtschaft soll mehr CO_2 in Biomasse längerfristig gebunden werden. Als standortgerechte, nachhaltige Bewirtschaftungsform würde sie einen zusätzlichen Beitrag zum Schutz der Biodi-

versität leisten. Beim Einsatz von geklonten, nicht standortgerechten, genmanipulierten oder Mono-Kulturen wäre die Durchführung umstritten.

Ozeandüngung

Diese nach theoretischen Berechnungen sehr effektive Geoengineering Technologie zielt auf die Manipulation der biologischen Pumpe⁷ der Ozeane ab. Kleinste Algen sollen durch Düngung zum Massenwachstum angeregt werden. Beim Absterben der Algen würde das in ihnen gespeicherte CO₂ in die Tiefsee absinken. Bisherige Experimente bestätigten eine Wirksamkeit, allerdings wurden nicht die vorhergesagten großen Mengen CO₂ gebunden. Zum besseren Verständnis der Meeresdüngung bedürfen vor allem die komplexen Vorgänge in den marinen Nahrungsketten noch weiterer Erforschung.

Manipulation mariner Schichtung

a. Förderung von CO₂ reichem Tiefenwasser

Zur Erzeugung einer künstlichen Algenblüte soll mittels Pumpen CO₂ reiches Tiefenwasser an die Oberfläche befördert werden. Eine erste Pilotanlage wird getestet. Es liegen noch keine umfassenden Ergebnisse vor. Die Technologie weißt Parallelen zur Ozeandüngung auf und könnte mit ähnlichen Problemen konfrontiert werden.

Zusätzlich könnte das mit CO₂ gesättigte Tiefenwasser, das schädliche Klimagas an die Atmosphäre abgeben und so den Klimawandel verstärken.

b. Forciertes Absenken von CO₂ reichem Oberflächenwasser

Verschiedene Techniken wurden daraufhin untersucht, ob mit ihnen die physikalischen Pumpe⁹ der Ozeane so manipuliert werden kann, dass CO₂ reiches Oberflächenwasser schneller in die Tiefsee absinkt. Als durchführbar und bezahlbar wurde nur die Erzeugung von künstlichem Meereis, zur Verstärkung der Abkühlung, identifiziert. Problematisch an allen untersuchten Techniken ist unter anderem der Eingriff in die noch nicht vollständig aufgeklärten globalen Meeresströmungen. Hinzu kommt, dass der Klimawandel bereits zu einer Verlangsamung der Ströme geführt hat und für einen Nettogewinn in der CO₂-Speicherung diese Abschwächung erst überwunden werden müsste.

Ozeankalkung

Die Ozeankalkung versucht ebenso die physikalische Pumpe der Ozeane zu verstärken, indem sie durch die Zugabe von Kalk aus terrestrischem Kalkstein den pH-Wert des Meerwassers erhöht. Meerwasser mit einem hohen pH-Wert kann mehr CO₂ aus der Luft aufnehmen. Die Methode wäre energieintensiv (thermische Zersetzung des Kalksteins zu Kalziumoxid) und mit hohem

⁷ Unter der „Biologische Pumpe“ der Ozeane versteht man das Absinken abgestorbenen organischen Materials in die Tiefsee. In Tiefen von 2.000 bis 4.000 Metern können so große Mengen Kohlenstoff, gebunden als Kohlenstoff-Reservoir, für über 1.000 Jahre lagern.

⁸ „Die physikalische Pumpe wird durch das Absinken kalter Wassermassen mit hoher Dichte (bedingt durch den hohen Salzgehalt) in Nordatlantik und dem Gebiet des antarktischen Zirkumpolarstroms angetrieben. Die absinkenden Wassermassen steigen an anderer Stelle im Ozean wieder auf, wodurch globale Meeresströmungen in Gang gesetzt werden.“ (Bundesumweltamt 2011: 24f.) Der Transport des Wassers durch die Tiefsee ist ein sehr langsamer Prozess und nimmt mehrere hundert bis tausend Jahre in Anspruch.

logistischen Aufwand verbunden. Eine positive Wirkung auf die global zunehmende Versauerung der Ozeane ist umstritten, da der Eintrag des Kalks nur lokal begrenzt erfolgen kann. Welche Auswirkungen die Ausbringung (Eintrübung, lokal erhöhter pH-Wert) auf marine Ökosysteme hat, ist Gegenstand laufender Untersuchungen.

Nutzung der Prozesse bei der Verwitterung

CO₂ wird auch durch natürliche Verwitterungsprozesse aus der Atmosphäre entfernt. Verschiedene Methoden versuchen diese Prozesse nachzuahmen oder zu beschleunigen. Die in großen Mengen vorhandenen Ausgangsstoffe müssten zum großen Teil erst im Berg- oder Tagebau abgebaut und aufbereitet werden. Der Einsatz der sowohl technisch als auch chemisch machbaren Methoden ist insofern begrenzt, dass für eine signifikante Speicherung von CO₂ sehr große Mengen an Ausgangsgestein nötig sind. Die Methoden wären damit sehr kosten- sowie energieintensiv und könnten lokale Umweltschäden verursachen.

Gesamteinschätzung der CDR-Methoden

Der Entzug von CO₂ aus der Atmosphäre setzt näher an den Ursachen des Klimawandels an als SRM-Methoden. Gleichzeitig wird der Versauerung der Meere entgegengewirkt. Dieser Effekt wird bei einigen marinen CDR-Methoden negiert, da sie potenziell die Versauerung verstärken. Die Wirksamkeit der meisten Methoden basiert auf einer nachhaltigen Speicherung des CO₂ über lange Zeiträume. Grenzen werden daher unmittelbar durch die Verfügbarkeit geeigneter Speicherkapazitäten gesetzt. Dabei muss beachtet werden, dass neben der Sicherstellung der Umweltverträglichkeit

und Sicherheit auch von einer Konkurrenz zu anderen Nutzungsverfahren des Untergrundes (Rohstoffgewinnung, Geothermie, Energiespeicherung) auszugehen ist. Die Maßnahmen unterscheiden sich stark in den Risiken für Mensch und Umwelt. Einige Maßnahmen (Landnutzungsmanagement) eignen sich für eine Verbesserung der momentanen Umweltsituationen, wogegen andere, vor allem marine Maßnahmen, Eingriffe in komplexe ozeanische Strukturen und Zirkulationssysteme darstellen. Die Folgen können heute weder ausreichend vorhergesehen, noch abgeschätzt werden. „Für eine abschließende Bewertung der Wirkungen und Folgen der Vorschläge zur Bindung liegen keine ausreichenden Erkenntnisse vor. Bislang ist keiner der Vorschläge hinreichend entwickelt und ausgereift, und es gibt fast keine Beispiele für eine praktische Umsetzung“ (Umweltbundesamt 2011: 31).

Der Vergleich von SRM- und CDR-Methoden zeigt, dass die Methoden zur Beeinflussung des Strahlungshaushaltes schneller relevante Effekte erzielen können, als diejenigen zur CO₂-Festsetzung. Zusätzlich verlangt die CO₂-Speicherung in der Regel einen hohen technischen, ökonomischen und zeitlichen Aufwand.

Tabelle 2: CDR-Technologien (Tabelle wird auf der nächsten Seite fortgesetzt).

Technologie	Forschungsstand ¹¹	Potenzielle Effektivität ¹²	Kostenfaktoren ¹³	Potenzielle Konsequenzen ¹⁴
Abscheidung und Speicherung von CO ₂	<p>Niedrig (TRL 2)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Grundlegende Funktionsweise erforscht und publiziert • Systemkonzept veröffentlicht • Erste Pilotanlagen testen CCS bei Kohleverstromung (ohne Speicherung des CO₂) • Keine experimentelle Bestätigung der Funktionsweise des gesamten Verfahrensablaufes, die eine CO₂ Reduzierung induziert • Abhängig von neuen Technologien zur Abscheidung und geologischen Speicherung CO₂ • Kommerzielle Verfügbarkeit ab 2025 	<p>Keine Angaben</p> <ul style="list-style-type: none"> • Nachteil: Anstieg der CO₂ Emission, wenn Energie für die Abscheidung/Speicherung aus fossilen Brennstoffen gewonnen wird (30% mehr Kohle pro produzierter Kilowattstunde bei Kohleverstromung) • Abhängig von der tatsächlich verfügbaren Kapazität geeigneter Speichermedien 	<p><u>Kostenfaktoren:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Realisierbarkeit ist abhängig von Verhalten und Entwicklung des Emissionshandels • Entwicklung und Umsetzung von Abscheideanlagen (inklusive Infrastruktur) • Infrastruktur und Transport zum Speicherort • Aufbau und Unterhalt eines CO₂ Lagers an geeigneten geologischen Schichten 	<ul style="list-style-type: none"> • Konkurrenz zu anderen Nutzern des Untergrundes • Bei der Speicherung im Untergrund besteht das Risiko für Leckagen und der Verunreinigung des Grundwassers

Quellen: Royal Society (2009), US-GAO (2011), Umweltbundesamt (2011) und Rickels et al. (2011).

Tabelle 2: CDR-Technologien (Tabelle wird auf der nächsten Seite fortgesetzt).

Technologie	Forschungsstand ¹¹	Potenzielle Effektivität ¹²	Kostenfaktoren ¹³	Potenzielle Konsequenzen ¹⁴
Nutzung von Bioenergie mit Kohlenstoffabscheidung und -speicherung (BE-CCS)	<p>Niedrig (TRL 2)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Grundlegende Funktionsweise erforscht und publiziert • Systemkonzept veröffentlicht • Keine experimentelle Bestätigung der Funktionsweise, die eine CO₂ Reduzierung induziert • Abhängig von neuen Technologien zur Abscheidung und geologischen Speicherung CO₂ 	<p>Niedrig bis Mittel</p> <ul style="list-style-type: none"> • Maximale Reduzierung von atmosphärischen CO₂: 50–150 bis 2100 ppm • Unter idealen Bedingungen negative Nettokohlenstoffbilanz • Abhängig von der Pflanzenproduktivität und dem Angebot an geeigneter Biomasse • Abhängig von der tatsächlich verfügbaren Kapazität geeigneter Speichermedien 	<p><u>Kostenfaktoren:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Realisierbarkeit ist abhängig von Verhalten und Entwicklung des Emissionshandels • Wert der anderweitigen Landnutzung • Große landwirtschaftliche Nutzflächen für den Anbau von Biomasse nötig • Art der verwendeten Biomasse • Prozessenergie während der Bioenergieerzeugung • Infrastruktur und Transport zum Speicherort • Aufbau und Unterhalt eines CO₂ Lagers an geeigneten geologischen Schichten <p><u>Kosten:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Schätzungen der Kosten variieren zwischen 150– 500 USD pro Tonne gespeichertes CO₂ (ohne Berücksichtigung von Transport, Speicherung und anderen Kosten) 	<ul style="list-style-type: none"> • Konkurrenz zu anderen Land- bzw. Biomassenutzern, Folgen für Lebensmittelpreise, Wasserressourcen, Düngemittel • Konkurrenz zu anderen Nutzern des Untergrundes (Geothermie, Bergbau) • Bei der Speicherung im Untergrund besteht das Risiko für Leckagen und einer Verunreinigung des Grundwassers

Quellen: Royal Society (2009), US-GAO (2011), Umweltbundesamt (2011) und Rickels et al. (2011).

Tabelle 2: CDR-Technologien (Tabelle wird auf der nächsten Seite fortgesetzt).

Technologie	Forschungsstand ¹¹	Potenzielle Effektivität ¹²	Kostenfaktoren ¹³	Potenzielle Konsequenzen ¹⁴
Abscheidung und Speicherung von CO ₂ aus der Umgebungsluft	<p>Niedrig (TRL 3)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Grundlegende Funktionsweise erforscht und publiziert • Systemkonzept veröffentlicht • Wirksamkeit mit Prototypen auf Laborbasis demonstriert • Modelle für CO₂ Aufnahme und Transport entwickelt und für Risikoanalysen verwendet • Kein Nachweis für die Zusammenarbeit von Einzelkomponenten des Gesamtsystems • Keine Pläne und Prototypen für die großindustrielle Verwendung • Weit fortgeschrittene Forschung zur Speicherung von CO₂ im Untergrund aber keine praktische Anwendung im großtechnischen Rahmen 	<p>Keinen Angaben</p> <ul style="list-style-type: none"> • Theoretisch könnte die Methode das gesamte global anthropogene CO₂ pro Jahr einsammeln (33 Gigatonnen pro Jahr) • Nachteil: möglicher Anstieg der CO₂ Emission, wenn die Energie für die Abscheidung/Speicherung aus fossilen Brennstoffen gewonnen wird • Abhängig von der tatsächlich verfügbaren Kapazität geeigneter Speichermedien • Unklarheit über die technische Skalierbarkeit 	<p><u>Kostenfaktoren:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Realisierbarkeit ist abhängig von Verhalten und Entwicklung des Emissionshandels • Prozessenergie für die Abscheidung von CO₂ aus der Luft • Aufbau und Unterhalt eines CO₂ Lagers an geeigneten geologischen Schichten <p><u>Kosten:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Schätzungen der Kosten variieren zwischen 27–630 USD und mehr pro Tonne gespeichertes CO₂ (ohne Berücksichtigung von Transport, Speicherung und anderen Kosten) 	<ul style="list-style-type: none"> • Während des Prozesses werden potenziell gefährliche Materialien und Chemikalien verwendet • Konkurrenz zu anderen Nutzern des Untergrundes (Geothermie, Bergbau) • Bei der Speicherung im Untergrund besteht das Risiko für Leckagen und der Verunreinigung des Grundwassers

Quellen: Royal Society (2009), US-GAO (2011), Umweltbundesamt (2011) und Rickels et al. (2011).

Tabelle 2: CDR-Technologien (Tabelle wird auf der nächsten Seite fortgesetzt).

Technologie	Forschungsstand ¹¹	Potenzielle Effektivität ¹²	Kostenfaktoren ¹³	Potenzielle Konsequenzen ¹⁴
Methoden auf Basis von Biokohle und Biomasse	<p>Niedrig (TRL 2)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Grundlegende Funktionsweise erforscht und publiziert • Systemkonzept veröffentlicht • Wirksamkeit bei der Bindung von CO₂ in Modellen und in Experimenten demonstriert, Wirksamkeit als dauerhafter Speicher noch unsicher • Bisher keine Praxis in großtechnischem klimarelevantem Rahmen, keine Planungen für großtechnische Prototypen • Unsicherheiten über die Kapazität zur CO₂ Reduzierung 	<p>Niedrig</p> <ul style="list-style-type: none"> • Maximale Reduzierung von atmosphärischen CO₂: 10–50 bis 2100 ppm • Maximale nachhaltige Reduktion: 1 bis 2 Gigatonnen CO₂ pro Jahr • Unter idealen Bedingungen negative Netto Kohlenstoffbilanz (vergleichbar mit BE-CCS) 	<p><u>Kostenfaktoren:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Realisierbarkeit ist abhängig von Verhalten und Entwicklung des Emissionshandels • Wert der Bodenfruchtbarkeit • Umwandlung zu Biokohle mit Nebenkosten • Prozessenergie während der Bioenergieerzeugung (Biokohle Umwandlungsenergie) <p><u>Kosten:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Schätzungen der Kosten variieren zwischen 2–62 USD pro Tonne gespeichertes CO₂ 	<ul style="list-style-type: none"> • Konkurrenz zu anderen Biomassenutzern, Folgen für Lebensmittelpreise, Wasserressourcen, Düngemittel • Effekte auf die Bodenfruchtbarkeit (Entzug von Nährstoffen) • Risiken für Gesundheit und Umwelt bei der Biokohleherstellung • Verbesserung der Bodenqualität (Einsatz von Biokohle) und Ertragssteigerungen

Quellen: Royal Society (2009), US-GAO (2011), Umweltbundesamt (2011) und Rickels et al. (2011).

Tabelle 2: CDR-Technologien (Tabelle wird auf der nächsten Seite fortgesetzt).

Technologie	Forschungsstand ¹¹	Potenzielle Effektivität ¹²	Kostenfaktoren ¹³	Potenzielle Konsequenzen ¹⁴
Landnutzungsmanagement	<p>Niedrig (TRL 2)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Grundlegende Funktionsweise erforscht und publiziert • Techniken vielfach erprobt • Systemkonzept veröffentlicht, Abschätzungen des CO₂ Einsparungspotenzials beruhen auf Modelstudien • Keine experimentell bestätigten Daten zur Demonstration der Wirksamkeit • Bisher keine Praxis in großflächigem klimarelevantem Rahmen, keine Planungen oder Prototypen für großflächige Anwendung 	<p>Niedrig bis Mittel</p> <ul style="list-style-type: none"> • Potenzielle Reduzierung um 1,3 bis 13,8 Gigatonnen CO₂ pro Jahr • Speicherung von 0,4 bis 14,2 Tonnen CO₂ pro Acre¹⁰ pro Jahr • Abgabe des gespeicherten CO₂ möglich 	<p><u>Kostenfaktoren:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Realisierbarkeit ist abhängig von Verhalten und Entwicklung des Emissionshandels • Wert der anderweitigen Landnutzung • Große Flächen für die Aufforstung oder Schutzzonen • Verwendeten Pflanzenarten • Instandhaltung und Unterhalt von Wäldern und/oder Schutzgebieten • Vermessung, Beobachtung und Verifikation <p><u>Kosten:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Schätzungen der Kosten variieren zwischen 19–101 USD pro Tonne gespeichertes CO₂ 	<ul style="list-style-type: none"> • Positive Effekte jenseits des Klimawandels für die Umwelt • Abstimmungen über Landnutzung

Quellen: Royal Society (2009), US-GAO (2011), Umweltbundesamt (2011) und Rickels et al. (2011).

⁹ 1 Acre entspricht 4047 Quadratmetern

Tabelle 2: CDR-Technologien (Tabelle wird auf der nächsten Seite fortgesetzt).

Technologie	Forschungsstand ¹¹	Potenzielle Effektivität ¹²	Kostenfaktoren ¹³	Potenzielle Konsequenzen ¹⁴
Ozeandüngung	<p>Niedrig (TRL 2)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Grundlegende Funktionsweise erforscht und publiziert • Systemkonzept veröffentlicht • Auf kleine Flächen begrenzte Freilandexperimente, Ergebnisse uneindeutig • Wissenschaftliche Veröffentlichungen zu größten Teil Theorien • Bisher keine Praxis in großflächigem klimarelevantem Rahmen, keine Planungen oder Prototypen für großflächige Anwendung 	<p>Niedrig</p> <ul style="list-style-type: none"> • Maximale Reduzierung von atmosphärischen CO₂: 10 – 30 bis 2100 ppm • Unsicherheiten umfassen <ol style="list-style-type: none"> 1) Dauer des Absinkens gebundenen CO₂ 2) Einfluss des marinen Ökosystems 3) Intervalle Düngerausbringung • Ergebnisse der Freilandexperimente begrenzt verstanden oder nicht ausreichend dokumentiert 	<p><u>Kostenfaktoren:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Realisierbarkeit ist abhängig von Verhalten und Entwicklung des Emissionshandels • Entwicklung und Umsetzung eines Systems zur Ozeandüngung, inklusive Transport und Verteilung der Materialien • Abbau und Transport geeigneter Düngemittel, inkl. Infrastruktur <p><u>Kosten:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Schätzungen der Kosten variieren zwischen 8–80 USD pro Tonne gespeichertes CO₂ 	<ul style="list-style-type: none"> • Effekte auf das marine Ökosystem nicht ausreichend aufgeklärt • Risiko der Erzeugung giftigen Algenblüte

Quellen: Royal Society (2009), US-GAO (2011), Umweltbundesamt (2011) und Rickels et al. (2011).

Tabelle 2: CDR-Technologien (Tabelle wird auf der nächsten Seite fortgesetzt).

Technologie	Forschungsstand ¹¹	Potenzielle Effektivität ¹²	Kostenfaktoren ¹³	Potenzielle Konsequenzen ¹⁴
Manipulation mariner Schichtung	Niedrig <ul style="list-style-type: none"> • Grundlegende Funktionsweise erforscht und publiziert • Systemkonzept veröffentlicht • Wirksamkeit und Effektivität in theoretischen Modellen berechnet • Erste Prototypen einzelner Komponenten in Einzelversuchen • Kein Nachweis für die Zusammenarbeit von Einzelkomponenten des Gesamtsystems • Keine Pläne und Prototypen für die großindustrielle Verwendung 	Keine Angaben <ul style="list-style-type: none"> • Abgabe des im Tiefenwasser gespeicherten CO₂ möglich • Bei Untersuchung Evaluierung mehrerer Methoden (Theorie), nur eine Technologien als durchführbar und finanzierbar (Zhou & Flynn 2005) • Unklarheit über die technische Skalierbarkeit 	<u>Kostenfaktoren:</u> <ul style="list-style-type: none"> • Realisierbarkeit ist abhängig von Verhalten und Entwicklung des Emissionshandels • Entwicklung und Aufbau eines Systems zur Schichten Manipulation auf dem Ozean (Equipment und Infrastruktur) • Unterhalt und Wartung <u>Kosten:</u> <ul style="list-style-type: none"> • Schätzungen gehen von 177 USD pro Tonne gespeichertes CO₂ aus 	<ul style="list-style-type: none"> • Bei Großanlagen auf dem Meer Risiko für Meeresorganismen, diverse negative Folgen Wirtschaftszweige (Fischerei, Tourismus, Schifffahrt, Militär) • Eingriff in hochkomplexe sensible Zirkulationssysteme – Effekte nicht ausreichend aufgeklärt

Quellen: Royal Society (2009), US-GAO (2011), Umweltbundesamt (2011) und Rickels et al. (2011).

Tabelle 2: CDR-Technologien (Tabelle wird auf der nächsten Seite fortgesetzt).

Technologie	Forschungsstand ¹¹	Potenzielle Effektivität ¹²	Kostenfaktoren ¹³	Potenzielle Konsequenzen ¹⁴
Ozeankalkung	<p>Niedrig</p> <ul style="list-style-type: none"> • Grundlegende Funktionsweise erforscht und publiziert • Systemkonzept veröffentlicht • Wissenschaftliche Veröffentlichungen zu größten Teil Theorien • Bisher keine Praxis in großflächigem klimarelevantem Rahmen, keine Planungen oder Prototypen für großflächige Anwendung 	<p>Keine Angaben</p> <ul style="list-style-type: none"> • Theoretischer Bedarf von 1,5 Kubikkilometer Kalkstein für die Speicherung von 1 Gigatonne CO₂ im Ozean • Oberflächenwasser zumeist mit Kalk übersättigt, erst in Tiefen von mehreren tausend Metern Untersättigung • Vertikale Verteilungsprozesse in große Tiefen dauern sehr lange (Tausende Jahre) 	<p><u>Kostenfaktoren:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Realisierbarkeit ist abhängig von Verhalten und Entwicklung des Emissionshandels • Entwicklung und Umsetzung eines Systems zur Kalk einbringung, inklusive Transport und Verteilung der Materialien • Abbau und Transport von Kalkstein und Umwandlung in Kalziumoxid, inkl. Infrastruktur 	<ul style="list-style-type: none"> • Effekte auf das marine Ökosystem nicht ausreichend aufgeklärt • Potenziell unerwünschte Auswirkungen (z.B.: auf die Umwelt) durch großformatigen Bergbau und Transport

Quellen: Royal Society (2009), US-GAO (2011), Umweltbundesamt (2011) und Rickels et al. (2011).

Tabelle 2: CDR-Technologien (Tabelle wird auf der nächsten Seite fortgesetzt).

Technologie	Forschungsstand ¹¹	Potenzielle Effektivität ¹²	Kostenfaktoren ¹³	Potenzielle Konsequenzen ¹⁴
Nutzung der Prozesse bei der Verwitterung	Niedrig (TRL 2) <ul style="list-style-type: none"> • Grundlegende Funktionsweise erforscht und publiziert • Systemkonzept veröffentlicht • Keine experimentelle Bestätigung des Konzeptes • Keine praktischen Erfahrungen in klimarelevanten Größenordnungen, keine Planungen oder Prototypen für großflächige Anwendung 	Keine Angaben <ul style="list-style-type: none"> • Nur begrenzt wissenschaftliche Studien • Einige Abschätzungen beruhen auf Modellbildung, variieren aber in der Bewertung der Effektivität 	<u>Kostenfaktoren:</u> <ul style="list-style-type: none"> • Realisierbarkeit ist abhängig von Verhalten und Entwicklung des Emissionshandels • Entwicklung und Umsetzung einer induzierten silikatbasierten Verwitterung inklusive Transport und Verteilung der Materialien • Abbau und Transport silikathaltigen Gesteins, inkl. Infrastruktur <u>Kosten:</u> <ul style="list-style-type: none"> • Schätzungen der Kosten variieren zwischen 4–100 USD pro Tonne gespeichertes CO₂ 	<ul style="list-style-type: none"> • Potenziell unerwünschte Auswirkungen (z.B: Umwelt) durch großformatigen Bergbau und Transport

Quellen: Royal Society (2009), US-GAO (2011), Umweltbundesamt (2011) und Rickels et al. (2011).

¹⁰ Der Forschungsstand in der Tabelle gibt an, inwieweit eine Methode/Technologie entwickelt ist in Bezug ihrer Wirksamkeit gegen den Klimawandel. Der hier verwendete *Technology Readiness Level (TRL)* Wert wurde aus einer Studie des *United States Government Accountability Office* übernommen (US-GAO 2011: 13–42). Der *TRL* wurde ursprünglich von der NASA entwickelt und gibt auf einer Skala von 1 bis 9 an, inwieweit eine Technologie entwickelt ist (Mankins 1995).

¹¹ Die potenzielle Effektivität enthält je nach Angaben in der Literatur quantitative Einschätzungen aus zwei Berechnungen: maximal mögliche Reduzierung von atmosphärischen CO₂ in Promille bis 2100 und die jährliche Kapazität des aus der Atmosphäre zu bindenden CO₂ in Gigatonnen. Wenn eine Technologie bzw. eine Teilkomponente in der Literatur mit entscheidenden Unsicherheiten bezüglich ihrer Wirksamkeit gegen den Klimawandel bezeichnet wurde, fiel die Gesamtbewertung der Effektivität entsprechend niedriger aus.

¹² Die Angaben für die Kosten von Geoengineering Maßnahmen variieren stark je nach Herausgeber der wissenschaftlichen Studien. Zur Einordnung der Größenordnungen können die Zahlen für die Ausgaben in Forschung und Entwicklung für herkömmliche Emissionskontrolle (Simulationsergebnisse *World Energy Outlook* für mittelfristige Stabilisierung auf 450 ppm CO₂equiv (IEA 2010) herangezogen werden: 220 Mrd. USD/Jahr (2010–2020); 940 Mrd. USD/Jahr (2020–2035); 1.280 Mrd. USD/Jahr (2030–2035). Außerdem geht man bei herkömmlicher Emissionskontrolle für 2035 von Kosten zwischen 90 und 120 USD pro eingelagerter Tonne CO₂ aus.

¹³ Berücksichtigt potenzielle Konsequenzen, Risiken und positive Nebenfolgen.

Literatur:

- Action Group on Erosion, Technology and Concentration (ETC Group) 2009: Retooling the Planet? Climate Chaos in the Geoengineering Age*, Stockholm, in: http://www.etcgroup.org/sites/www.etcgroup.org/files/publication/pdf_file/Retooling%20the%20Planet%201.2.pdf; 10.09.2012.
- Action Group on Erosion, Technology and Concentration (ETC Group) 2010a: Geopiracy: The Case Against Geoengineering*, Ottawa, in: <https://www.cbd.int/doc/emerging-issues/etcgroup-geopiracy-2011-013-en.pdf>; 10.09.2012.
- Action Group on Erosion, Technology and Concentration (ETC Group) 2010b: Hands of Mother Earth*, Stockholm.
- Barrett, T. 2007: The Incredible Economics of Geoengineering, in: *Environ Resource Econ* 39: 45–54.
- Beck, U. 2007: Weltrisikogesellschaft, Frankfurt a.M.
- Betz, G./Cacean, S. 2012: Ethical Implications of Geoengineering, Karlsruhe, in: <http://digbib.ubka.uni-karlsruhe.de/volltexte/1000028245>; 10.09.2012.
- Bickel, E.J./Lane, L. 2009: An Analysis of Climate Engineering as a Response to Climate Change, Kopenhagen, in: <http://fixtheclimate.com/component-1/the-solutions-new-research/climate-engineering/>; 10.09.2012.
- Borick, C./Rabe, B. 2012: Americans Cool on Geoengineering Approaches to Addressing Climate Change, *Issues in Governance Studies* 46, in: <http://www.brookings.edu/~media/research/files/papers/2012/5/30%20geo%20engineering%20rabe%20borick/30%20geo%20engineering%20rabe%20borick.pdf>; 10.09.2012.
- Bracmort, K./Lattanzio, R.K./Barbour, E.C. 2011: *Geoengineering: Governance and Technology Policy (Report of the US Congressional Research Service)*, in: <http://www.fas.org/sgp/crs/misc/R41371.pdf>; 10.09.2012.
- Bundesregierung 2012: *Geoengineering/Climate-Engineering: Drucksache 17/9943*, in: <http://dip21.bundestag.de/dip21/btd/17/103/1710311.pdf>; 10.09.2012.
- Buzan, B./Waever, O./Wilde, Jaap de 1998: *Security: A New Framework for Analysis*, Boulder, CO.
- Center for Global Development (Hrsg.) 2012: *Mapping the Impacts of Climate Change*, in: http://www.cgdev.org/section/topics/climate_change/mapping_the_impacts_of_climate_change; 10.09.2012.
- Coble, B.B. 1997: *Benign Weather Modification (Thesis, School of Advanced Airpower Studies)*, Washington D.C.
- Corner, A./Pidgeon, N. 2010 : *Geoengineering: The Climate the Social and Ethical Implications*, in: *Environment Magazine* 52: 26-37.
- Crutzen, P. J. 2006: *Albedo Enhancement by Stratospheric Sulfur Injections: A Contribution to Resolve a Policy Dilemma?*, *Climate Change* 77, 211–220.
- Daase, C. 2012: *Sicherheitskultur als interdisziplinäres Forschungsprogramm*, in: Daase, C./Offermann, P./Rauer, V. (Hrsg.): *Sicherheitskultur: Soziale und politische Praktiken der Gefahrenabwehr*, Wiesbaden.
- Dröge, S. (Hrsg.) 2010: *International Climate Policy: Priorities of Key Negotiating Parties*, SWP Research Paper 2, Berlin.
- Dröge, S. 2011: *Geoengineering auf dem Vormarsch: Klimafolgenabwehr durch die USA und China*, in: Perthes, V./Lippert, B. (Hrsg): *Ungeplant ist der Normalfall. Zehn Situationen, die politische Aufmerksamkeit verdienen*, Berlin, 15-18.
- Dröge, S. 2012: *Die Klimaverhandlungen in Durban: Erfolgreiche Diplomatie, aber kein Fortschritt für den Klimaschutz*, SWP-Aktuell 2012/A 03, Berlin.
- Erling, J. 2012: *China schießt auf Wolken, damit es mehr regnet*, in: <http://www.welt.de/politik/aus->

- land/article106368801/China-schiesst-auf-Wolken-damit-es-mehr-regnet.html; 10.09.2012.
- Geden, O./Kremer, M. 2009: Europäische Union: Vorreiter für eine ehrgeizige internationale Klimapolitik, in: Dröge, S. (Hrsg.): Die internationale Klimapolitik: Prioritäten wichtiger Verhandlungsmächte, Berlin, 30-37.
- Gordon, B. (Hrsg.) 2010: Engineering the Climate: Research Needs and Strategies for International Coordination: Report for the US House of Representatives, in: <http://www.who.edu/fileserver.do?id=74967&pt=2&p=81828>; 10.09.2012.
- House, T.J./Near, J.B.Jr./Shields, W.B./Celentano, R.J./Husband, D.M./Mercer, A.E./Pugh, J.E. 1996: Weather as a Force Multiplier: Owning the Weather in 2025, in: <http://csat.au.af.mil/2025/volume3/vol3ch15.pdf>; 10.09.2012.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) 2011: IPCC Expert Meeting on Geoengineering, in: <http://www.ipcc-wg3.de/publications/supporting-material-1/EM-GeoE-Meeting-Report-final.pdf>; 10.09.2012.
- Jaeger, J./Jaeger, C.C. 2010: Warum zwei Grad?, in: *Aus Politik und Zeitgeschichte* 32-33: 7-15.
- Keith, D.W. 2000: Geoengineering the Climate: History and Prospect, in: *Annual Review of Energy and the Environment* 25: 245–284.
- Keith, D.W./Parson, E./Morgan, M.G. 2010: Research on Global Sun Block Needed Now, in: *Nature* 463: 426-427.
- Keohane, R.O. 1984: *After Hegemony: Cooperation and Discord in the World Political Economy*, Princeton, NJ.
- Kössler, G. P. 2012: *Geoengineering: Gibt es wirklich einen Plan (eten) B?*, Schriften zur Ökologie der Heinrich-Böll-Stiftung, Band 25, Berlin.
- Lane, L./Bickel, E. J./Galiana, I./Green, C./Bosetti, V. 2009: Copenhagen Consensus on Climate: Advice for Policymakers, Kopenhagen, in: <http://fixtheclimate.com/copenhagen-consensus-on-climate/>; 10.09.2012.
- Lane, L. 2011: U.S. National Interest: Climate Engineering and International Law, Washington D.C., in: www.hudson.org/files/publications/LeeLane--USNationalInterest--411.pdf; 10.09.2012.
- Leiserowitz, A. 2010: *Geoengineering and Climate Change in the Public Mind*, Presentation to the Asilomar International Conference on Climate Intervention Technologies 24.03.2010, Pacific Grove, CA.
- Lohbeck, W. 2004: *Umwelt und bewaffneter Konflikt: Dilemma ohne Ausweg?*, Hamburg.
- MacDonald, M. 2008: Securitization and the Construction of Security, in: *European Journal of International Relations* 14: 4, 563–587.
- Netherlands Environmental Assessment Agency (Hrsg.) 2012: Trends in Global CO₂ Emissions, in: http://www.pbl.nl/sites/default/files/cms/publicaties/PBL_2012_Trends_in_global_CO2_emissions_500114022.pdf; 10.09.2012.
- Ott, K. 2010: Argumente für und wider „Climate Engineering“: Versuch einer Kartierung, in: *KIT Technikfolgenabschätzung: Theorie und Praxis* 19: 2, 32-42.
- Proeßl, A./Güsov, K. 2011: Climate Engineering: Instrumente und Institutionen des internationalen Rechts, Trier, in: <http://www.kiel-earth-institute.de/sondierungsstudie-climate-engineering.html>; 10.09.2012.
- Renn, O./Brachatzek, N./Hiller, S. 2011: Climate Engineering: Risikowahrnehmung, gesellschaftliche Risikodiskurse und Optionen der Öffentlichkeitsbeteiligung, Stuttgart, in: <http://www.kiel-earth-institute.de/sondierungsstudie-climate-engineering.html>; 10.09.2012.
- Rickels, W./Klepper, G./Dovern, J./Betz, G./Brachatzek, N./Cacean, S./Gussow, K./Heintzenberg J./Hiller, S./Hoose, C./Leisner, T./Oschlies, A./Platt, U./Proeßl, A./Renn, O./Schaefer, S./Zürn M. 2011: Gezielte Eingriffe in das Klima? Eine Bestandsaufnahme der Debatte zu Climate Engineering. Sondierungsstudie für das Bundesministerium für Bildung und Forschung, Kiel, in: <http://www.kiel-earth-institute.de/sondierungsstudie-climate-engineering.html>; 10.09.2012.
- Robock, A. 2008: 20 Reasons why Geoengineering May Be a Bad Idea, in: *Bulletin of Atomic Scientists* 64: 2, 14-18.

- Robock, A. 2009: A Biased Economic Analysis of Geoengineering, in: <http://www.realclimate.org/index.php/archives/2009/08/a-biased-economic-analysis-of-geoengineering/>; 10.09.2012.
- Robock, A. 2012: Will Geoengineering With Solar Radiation Management Ever Be Used?, in: *Ethics, Policy and Environment* 15: 2, 202–205.
- Ross, A./Matthews, D.H. 2009: Climate Engineering and the Risk of Rapid Climate Change, in: *Environmental Research Letters* 4: 1–6.
- Royal Society (Hrsg.) 2009: *Geoengineering the Climate: Science, Governance and Uncertainty*, London, in: http://royalsociety.org/uploadedFiles/Royal_Society_Content/policy/publications/2009/8693.pdf; 10.09.2012.
- Scheer, D./Renn, O. 2010: Klar ist nur die Unklarheit: Sozio-ökonomische Dimensionen des Geoengineering, in: *Politische Ökologie* 120: 27–29.
- Schelling, T. 1996: The Economic Diplomacy of Geoengineering. in: *Climatic Change* 33: 303–307.
- Schmidt, H./Alterskjær, K./Bou Karam, D./Boucher, O./Jones, A./Kristjansson, J./Niemeier, U./Schulz, M./Aaheim, A./Benduhn, F./Lawrence, M./Timmreck, C. 2012: Solar Irradiance Reduction to Counteract Radiative Forcing from a Quadrupling of CO₂: Climate Responses Simulated by Four Earth System Models, in: *Earth System Dynamics* 3: 63–78.
- Sterck, W. 2010: Auf dem Weg zu einem neuen globalen Klimaabkommen?, in: *Aus Politik und Zeitgeschichte* 32–33: 22–28.
- Swart, R./Marinova, N. 2010: Policy Option in a Worst Case Climate Change World, in: *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 15: 531–549.
- Umweltbundesamt (Hrsg.) 2011: *Geo-Engineering wirksamer Klimaschutz oder Größenwahn? Methoden - Rechtliche Rahmenbedingungen - Umweltpolitische Forderungen*, Dessau-Roßlau, in: <http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/4125.pdf>; 10.09.2012.
- United Nations 1976: *Convention on the Prohibition of Military or Any Other Hostile Use of Environmental Modification Techniques*, in: <http://www.un-documents.net/enmod.htm>; 10.09.2012.
- United Nations Environmental Programme-Convention on Biodiversity (Hrsg.) 2012a: *Impacts of Climate-Related Geoengineering on Biological Diversity*, Montreal, in: <http://www.cbd.int/doc/meetings/sbstta/sbstta-16/information/sbstta-16-inf-28-en.pdf>; 10.09.2012.
- United Nations Environmental Programme-Convention on Biodiversity 2012b: *Technical and Regulatory Matters on Geoengineering in Relation to the Convention on Biodiversity*, in: <http://www.cbd.int/climate/geoengineering/>; 10.09.2012.
- United States Government Accountability Office 2011: *Climate Engineering: Technical Status, Future Directions, and Potential Responses*, in: <http://www.gao.gov/assets/330/322208.pdf>; 10.09.2012.
- Victor, D.G./M. Granger Morgan, M.G./Jay Apt/John Steinbruner, J.J./Ricke, K. 2009: *The Geoengineering Option: A Last Resort Against Global Warming?*, in: http://iis-db.stanford.edu/pubs/22456/The_Geoengineering_Option.pdfPolicy; 10.09.2012.
- Virgoe, J. 2009: International Governance of a Possible Geoengineering Intervention to Combat Climate Change, in: *Climatic Change* 95: 1, 103–119.
- Wacker, G. 2009: China in den Klimaverhandlungen: Zentrale Rolle zwischen den Stühlen, in: Dröge, S. (Hrsg.): *Die internationale Klimapolitik: Prioritäten wichtiger Verhandlungsmächte*, Berlin, 49–60.
- Westphal, K. 2009: Russland: Klimapolitik im Abseits, in: Dröge, S. (Hrsg.): *Die internationale Klimapolitik: Prioritäten wichtiger Verhandlungsmächte*, Berlin, 69–82.
- Wheeler, D. 2011: *Quantifying Vulnerability to Climate Change: Implications for Adaptation Assistance*, in: http://www.cgdev.org/files/1424759_file_Wheeler_Quantifying_Vulnerability_FINAL.pdf; 10.09.2012.
- Wiertz, T./Reichwein D. 2010: Climate Engineering zwischen Klimapolitik und Völkerrecht: Status quo und Perspektiven, in: *KIT-Technikfolgenabschätzung: Theorie und Praxis* 19: 2, 17–24.
- Wiertz, T. 2011: Klimakontrolle oder Klimakatastrophe? Gefahren im Diskurs um Geoengineering,

- in: Buciak, S.K./Allhoff, S.W./Maas, A. (Hrsg.): Globales Rapa Nui? Frieden und Sicherheit im Zeichen des Klimawandels, Göttingen, i.E. in: http://www.climate-engineering.uni-hd.de/md/climate-engineering/projects/people/wiertz_-_gefahren_im_diskurs.pdf; 10.09.2012.
- Winter, G. 2012: Climate Engineering and International Law: Last Resort or the End of Humanity?, in: *Review of European Community & International Environmental Law* 20: 3, 277-289.
- World Meteorological Organization 2007: WMO Statement on the Status of Weather Modification, in: http://www.wmo.int/pages/prog/arep/wwrp/new/weathermod_new.html; 10.09.2012.
- Zentrum für Transformation der Bundeswehr 2011: Klimafolgen im Kontext: Implikationen für Sicherheit und Stabilität im Nahen Osten und Nordafrika, Umweltdimensionen von Sicherheit Band 2, Strausberg.
- Zürn, M. 2011: Climate Engineering: Internationale Beziehungen und politische Regulierung, Berlin, in: <http://www.kiel-earth-institute.de/sondierungsstudie-climate-engineering.html>; 10.09.2012.

Die Autoren

Oberleutnant Sebastian Weise ist seit Januar 2012 als wissenschaftlicher Mitarbeiter im Dezernat Zukunftsanalyse unterstützend für den Bereich Politik tätig. Er studierte von 2006 bis 2010 an der Universität der Bundeswehr in München Staats- und Sozialwissenschaften mit der Vertiefungsrichtung Politik, Schwerpunkt Internationale Politik. Nach dem Ende seines Studiums war er unter anderem als Zugführer und S4-Offizier in verschiedenen Truppenverwendungen eingesetzt.

Inhaltliche Zu- und Vorarbeit:

Dr. Annika Vergin ist seit Dezember 2007 als wissenschaftliche Mitarbeiterin im Dezernat Zukunftsanalyse tätig und für den Themenbereich Umwelt verantwortlich. Sie studierte Biologie mit Schwerpunkt Physiologie und Immunologie an der Universität Potsdam und promovierte am Max-Planck-Institut für Kolloid- und Grenzflächenforschung Potsdam in physikalischer Chemie.

OTL i.G. Dr. Jörg Wellbrink hat 1985 an der Bundeswehruniversität München einen Abschluss als Dipl.-Ing. Elektrotechnik absolviert. 1998 hat er an der Naval Postgraduate School in Monterey, Kalifornien Operations Research (M.Sc. OR) studiert und dort in 2003 am MOVES-Institute promoviert. Später hat er als Projektinitiator und -leiter im IT-AmtBw die Simulations- und Testumgebung der Bundeswehr konzipiert. 2007 war er erster Leiter einer bundeswehreigenen „Operations Research“-Zelle im Afghanistan Einsatz im PRT KUNDUZ. 2011 war er ein Jahr als „Assistant Professor für OR“ an der Bundeswehruniversität München in Forschung und Lehre eingesetzt. Seit März 2012 ist er kommissarisch Dezernatsleiter Zukunftsanalyse.

Henning Hetzer war von Januar 2010 bis Dezember 2011 wissenschaftlicher Mitarbeiter im Dezernat Zukunftsanalyse und für den Themenbereich Technologie verantwortlich. Zuvor war er im Bereich „Technology Watch“ der Innovationsgesellschaft für fortgeschrittene Produktionssysteme in der Fahrzeugindustrie mbH (INPRO) tätig. Henning Hetzer hat Informationswissenschaft, Kunstgeschichte und Philosophie (M.A.) an der Freien Universität Berlin studiert sowie ein Studium der Elektrotechnik an der Technischen Universität Dresden und der Fernuniversität Hagen absolviert.

Hauptmann d.R. Michael Franke diente im Rahmen seiner Wehrübungen am Zentrum für Transformation der Bundeswehr und unterstützte das Dezernat Zukunftsanalyse. Nach seiner Dienstzeit in der Bundeswehr studierte er Politikwissenschaften an der Freien Universität Berlin. Seine Arbeitsschwerpunkte sind Energie- und Sicherheitspolitik.

