



Im Jahr 1889 ist der französische Romanautor Jules Verne wieder einmal seiner Zeit voraus. In seinem Buch „Der Schuss am Kilimandscharo“ planen seine Protagonisten, die Erdachse gerade zu rücken und damit die Jahreszeiten abzuschaffen. Das eigentliche Ziel ist jedoch eine Veränderung des Klimas: Schmilzt durch die Erd- und Klimakorrekturen das Eis der Arktis, kann man die in der Region vermuteten riesigen Kohlevorräte abbauen. Bewerkstelligt werden soll dies alles durch einen einzigen Schuss mit einer Riesenkana-

ze Reihe von Vorschlägen, um die Erderwärmung mit technischen Mitteln zu begrenzen oder sogar aufzuhalten. Sie verfolgen dabei zwei unterschiedliche Ziele: Mit einigen Methoden soll Kohlendioxid (CO₂) aus der Atmosphäre entfernt und so der Treibhauseffekt gebremst werden (*Carbon Dioxide Removal*, kurz CDR). Zum Einsatz kommen könnten dabei unter anderem künstliche Bäume oder eine Eisendüngung der Meere, mit der das Algenwachstum befördert wird. In beiden Fällen würden die Fotosynthese-Aktivität und

Geo-Engineering – Plan B zur Rettung des irdischen Klimas?

none. Der gewaltige Rückstoß, so haben die Berechnungen der Abenteurer ergeben, würde für die gewünschte Wirkung sorgen. Dass dadurch auch dramatische Änderungen des Meeresspiegels und verheerende Überschwemmungen auftreten könnten, nehmen sie billigend in Kauf. Trotz massiver Proteste in der Öffentlichkeit wird das Projektil abgefeuert. Aber der Plan scheitert, die Erdachse bleibt wie sie ist.

Waren technische Eingriffe in das Klima unseres Planeten zu Zeiten von Jules Verne noch reine literarische Gedankenspiele, so werden sie heute tatsächlich wissenschaftlich geplant und erprobt – bisher allerdings in kleinem Maßstab. Dass sich Politiker und Wissenschaftler überhaupt ernsthaft Gedanken zu diesem Thema machen, hat vor allem einen Grund: den fortschreitenden Klimawandel. Aktuelle Prognosen gehen davon aus, dass die global gemittelten Temperaturen bis Ende des 21. Jahrhunderts um bis zu etwa 6 Grad Celsius steigen könnten – mit dramatischen Folgen wie dem Verschwinden der Eisschilde und zunehmenden Wetterextremen.

Wenn alle Versuche des Klimaschutzes scheitern sollten, gilt Geo-Engineering als möglicher „Plan B“. Mittlerweile gibt es eine gan-

damit der Verbrauch von Kohlendioxid gesteigert. Andere Verfahren greifen dagegen in die Strahlungsbilanz der Erde ein. Sie sehen vor, Teile der ankommenden Sonnenstrahlung – etwa mit gewaltigen Sonnensegeln im All – zu reflektieren und so die Sonnenwärme von der unteren Erdatmosphäre fernzuhalten (*Solar Radiation Management, SRM*). →

► **Die Methoden zum Geo-Engineering sind umstritten.**



→ Viele der vorgeschlagenen Methoden sind jedoch unter Wissenschaftlern und in der Öffentlichkeit heftig umstritten (**Abb. A**). Denn es sind noch jede Menge Fragen zum Geo-Engineering offen. Wie gut funktionieren die unterschiedlichen Methoden tatsächlich? Wann wäre Geo-Engineering einsatzbereit? Und vor allem: Welche Klimawirkungen und Umweltrisiken haben die Verfahren, wenn sie in großem Maßstab eingesetzt werden?

Antworten darauf suchen Wissenschaftler wie Hauke Schmidt vom Max-Planck-Institut für Meteorologie in Hamburg. Zusammen mit Kollegen aus Deutschland, Frankreich und Norwegen arbeitet er in dem seit Juli 2009 laufenden EU-Projekt IMPLICC (engl. *Implications and risks of engineering solar radiation to limit climate change*). Um keine unnötigen Gefahren für Mensch und Natur heraufzubeschwören, führen die IMPLICC-Forscher ihre Experimente nicht im Großlabor Erde durch, sondern gehen den möglichen Folgen des Geo-Engineering mit Supercomputern auf den Grund. „Wir wollen mit Hilfe von Computersimulationen die Unsicherheit reduzieren, die bezüglich der Wirksamkeit und der potenziellen Nebenwirkungen der vorgeschlagenen Methoden bestehen“, erklärt Schmidt.

Die Wissenschaftler haben sich gleich drei Methoden aus dem Bereich **Solar Radiation Management** herausgepickt, um sie auf ihre Tauglichkeit zu prüfen: Zum einem handelt es sich dabei um riesige **Spiegel im Weltraum**, die das Sonnenlicht zurückwerfen sollen. Dieses aufwändige und technisch

schwer umzusetzende Verfahren hat nach Angaben der Forscher den Vorteil, dass sich der Effekt leicht in Klimamodellen simulieren lässt und man verschiedene Modelle gut miteinander vergleichen kann. Die beiden anderen Verfahren stellen schwerwiegende direkte Eingriffe in die Erdatmosphäre dar. Dies gilt vor allem für den Vorschlag, **Schwefelgase als Schutzschild** gegen die Sonnenstrahlung in die acht bis 50 Kilometer hoch gelegene Stratosphäre einzubringen. Diese Vision ist bereits über 30 Jahre alt und stammt eigentlich von dem russischen Klimawissenschaftler Michail Budyko. 2006 hat der niederländische Atmosphärenforscher und Chemie-Nobelpreisträger Paul Crutzen, der lange Zeit am Max-Planck-Institut für Chemie in Mainz geforscht hat, diese Idee erneut aufgegriffen und bekannt gemacht.

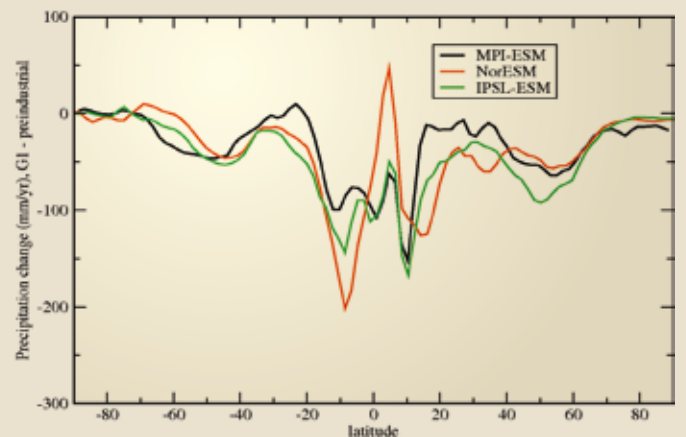
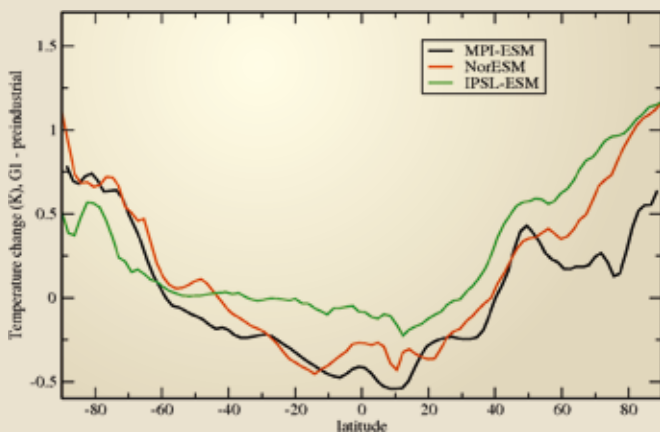
EIN SCHUTZSCHILD AUS SCHWEFEL

Inspiriert wurden Crutzen und seine Mitstreiter unter anderem durch ein Naturereignis, das sich im Jahr 1991 ereignete: den Ausbruch des Pinatubo-Vulkans auf der philippinischen Insel Luzon. Rund 17 Millionen Tonnen Schwefeldioxid wurden dabei hoch in die Atmosphäre geschleudert. Der Schwefel reagierte in der Stratosphäre mit Sauerstoff und es entstanden große Mengen an Sulfatpartikeln, die das Sonnenlicht streuten und reflektierten. Das Resultat war eine geringere Sonneneinstrahlung an der Erdoberfläche und damit ein Abkühlen der bodennahen Luftschichten. In den zwei Jahren nach der Pinatubo-Eruption gab es nach Berechnungen von Klimaforschern einen globalen Temperaturabfall von bis zu 0,4 Grad Celsius.

Crutzen schlägt vor, die Möglichkeit, die Stratosphäre mit Millionen Tonnen Schwefelwasserstoff oder Schwefeldioxid zu impfen, genauer zu untersuchen. Der Schwefel könnte mithilfe von Ballonen oder als Zusatz zum Flugzeugtreibstoff in die Stratosphäre gebracht werden. Da die Sulfatpartikel mit der Zeit zersetzt werden und ihre reflektierende Wirkung verlieren, müssten diese Maßnahmen allerdings regelmäßig wiederholt werden. 25 bis 50 Milliarden US-Dollar jährlich könnte der Sulfat-Schleier Schätzungen zufolge kosten.

Der dritte Schwerpunkt der IMPLICC-Wissenschaftler ist das sogenannte **Wolkenbleichen** oder Cloud Whitening. Dabei soll Seewasser in großen Mengen zerstäubt und in bestehende Wolken über den Ozeanen gesprüht werden. Dadurch entstehen dort nicht nur viel mehr, sondern auch viel kleinere Wassertröpfchen. Die Wolken würden so heller und könnten das Sonnenlicht stärker streuen und zurückwerfen (**siehe auch GEOMAX Aufgabe 10**).

Um die Effekte der Geo-Engineering-Maßnahmen zu erforschen, kommen drei unterschiedliche Klimamodelle zum Einsatz. Die Simulationen werden durchgeführt auf der Basis verschiedener Szenarien zur zukünftigen Treibhausgas-Entwicklung. Eines davon geht beispielsweise von einem ungebremsten Anstieg der Emissionen aus – und damit von einer Vervierfachung der CO₂-Konzentrationen in der Atmosphäre im Vergleich zum vorindustriellen Niveau. Die Wissenschaftler wollen die Ergebnisse ihrer



Die Abbildungen zeigen die Änderung der Oberflächentemperatur und des Niederschlags in einem durch Geo-Engineering (SRM) und CO₂-Vervielfachung beeinflussten Klima. Als Vergleichswerte dienen die Temperaturen des vorindustriellen Klimas. Die drei verschiedenfarbigen Graphen geben die Ergebnisse verschiedener Klimamodelle wieder.

Links: Durchschnittliche Veränderungen der Oberflächentemperatur (Grad Celsius in den verschiedenen geographischen Breiten). In polaren Breiten ist die Temperatur trotz Geo-Engineering leicht erhöht, während der durch die CO₂-Erhöhung zu erwartende Temperaturanstieg in den Tropen durch die Verminderung der Solarstrahlung leicht überkompensiert wird.

Rechts: Veränderungen des Niederschlags (mm/Jahr in den verschiedenen geographischen Breiten). Die Modelle prognostizieren eine Überkompensation durch Geo-Engineering, d. h. der Niederschlag nimmt ab. Besonders stark ist dieser Effekt in den Tropen – wo es absolut betrachtet auch den meisten Niederschlag gibt – und in den mittleren Breiten.

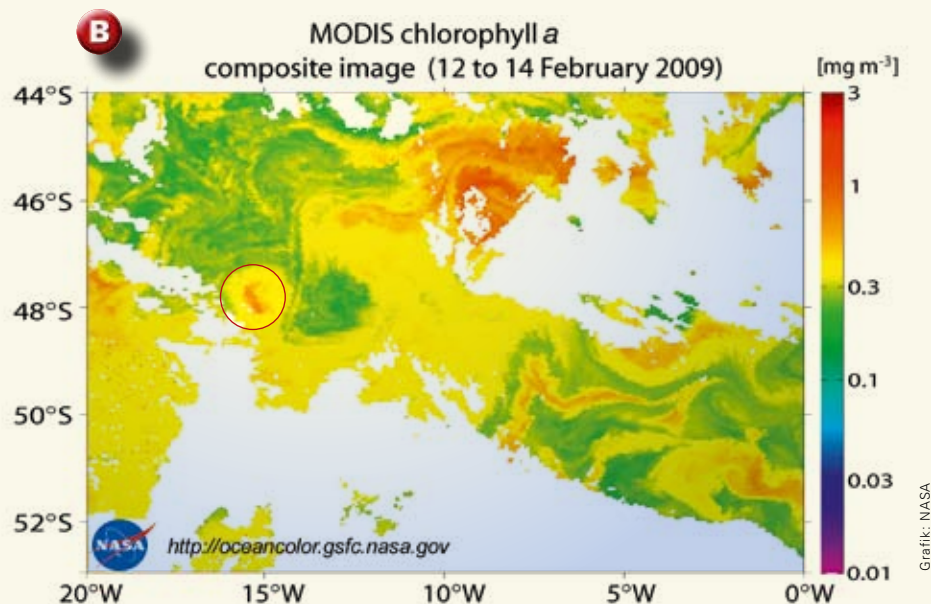
Simulationen vergleichen und insbesondere nach „robusten“ Resultaten suchen. Gemeint sind damit Wirkungen und Folgen des jeweiligen Ansatzes, die in allen Modellen auftauchen und deshalb als weitgehend gesichert gelten können.

Mittlerweile sind bereits einige Modellrechnungen durchgeführt worden und es liegen erste Ergebnisse unter anderem zur Schwefelinjektion in die Stratosphäre vor (**Kasten Seite 2**). Demnach würde die abkühlende Wirkung umso größer, je mehr Schwefel man in einem solchen Experiment in die Stratosphäre einbringt. Eine Verdoppelung der Schwefeldosis würde allerdings nicht zu einem doppelt so großen Effekt führen, sondern nur zu einer moderaten Steigerung der Abkühlung, so die Resultate der Wissenschaftler. Das liegt daran, dass bei stärkerem Impfen vor allem größere Sulfatpartikel entstehen, die aufgrund ihres Gewichtes relativ schnell absinken und die Stratosphäre wieder verlassen. „Da der Vorschlag, Schwefel in die Stratosphäre einzutragen, dem natürlichen Beispiel großer Vulkaneruptionen folgt, kann man bei dieser Methode wohl am ehesten davon ausgehen, dass sie tatsächlich einen Abkühlungseffekt hat“, sagt Hauke Schmidt. Doch noch gilt es, einiges zu klären. So besteht bezüglich der Schwefelmenge, die nötig ist um eine nennenswerte Temperaturverringerung zu erzielen, mindestens eine Unsicherheit von einem Faktor zwei. Unklar ist zudem, ob das Verfahren technisch überhaupt realisierbar ist.

FATALE NEBENWIRKUNGEN

Die Simulationen liefern jedoch nicht nur Hinweise zur Effektivität der SRM-Verfahren, sie legen auch die Nebenwirkungen offen: Sollte es wirklich gelingen, die Temperatur auf ein vorindustrielles Niveau zu bringen, würde der Niederschlag zwischen drei und sechs Prozent abnehmen. Mit zehn bis 20 Prozent besonders ausgeprägt wäre dieser Trend über dicht besiedelten Landmassen, Europa und Nordamerika eingeschlossen. „Das heißt, wir würden tatsächlich ein ganz neues Klima erzeugen“, sagt Schmidt. Wie sich dieses auf die Landwirtschaft und somit auf die Nahrungsmittelversorgung der wachsenden Weltbevölkerung auswirken würde, ist noch unklar.

Dass speziell die Schwefelimpfung weitere negative Folgen für Mensch und Natur hat, konnte ein internationales Team von Atmosphärenforschern bereits 2008 belegen.



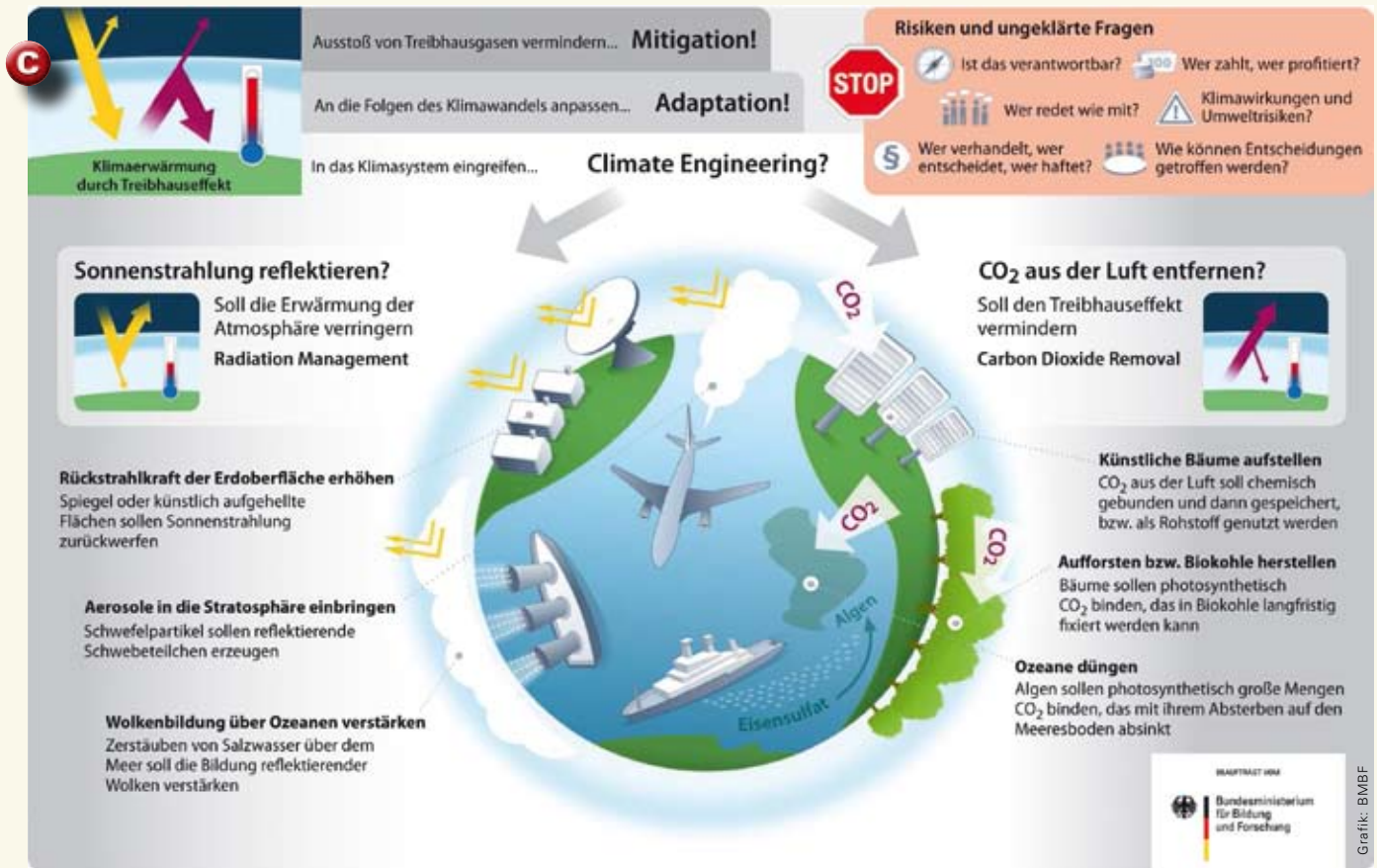
▲ Satellitenaufnahme der Chlorophyllkonzentrationen an der Meeresoberfläche mit der Lohafex-Blüte (eingekreist). Man beachte die entschieden größere natürliche Blüte oben rechts und die höheren Werte im Südosten.

Laut der Studie im Wissenschaftsmagazin SCIENCE käme es durch den Schwefel zu einer deutlichen Schädigung der Ozonschicht, dem Schutzschild der Erde gegen die gefährliche UV-Strahlung des Sonnenlichts. Zwischen einem Drittel und der Hälfte der Ozonschicht über der Arktis könnten durch diese Methode zerstört werden, so die Forscher. Über der Antarktis würde sich die aktuell langsam einsetzende Regenerierung der Ozonschicht zudem um weitere 30 bis 70 Jahre verzögern. Besonders riskant wäre es, wenn sich nach einem künstlichen Eintrag von Sulfaten noch ein größerer natürlicher Vulkanausbruch ereignet. „Dann wäre mit einem noch stärkeren, sehr ernsthaften Ozonabbau in der Stratosphäre zu rechnen“, sagt der Atmosphärenforscher Rolf Müller vom Forschungszentrum Jülich.

Intensiv erforscht werden auch die Vorschläge zum Einfangen von CO₂, zum **Carbon Dioxide Removal**. Ist man dort vielleicht schon einen Schritt weiter? Schnelle Hilfe für das Klima ist auch hier wohl nicht zu erwarten. Es stellt sich vor allem die Frage, wohin mit dem CO₂. Entsprechende Verfahren befinden sich erst im Teststadium. Das gilt etwa für die sogenannte **CCS-Technologie** (*Carbon Dioxide Capture and Storage*, kurz CCS). Dabei wird CO₂ beispielsweise aus der Abluftfahne von Kraftwerken abgetrennt und anschließend in unterirdischen Gesteinsschichten eingelagert. Ein großtechnischer Einsatz dieser Methode ist jedoch voraussichtlich frühestens in zehn bis 20 Jahren möglich.

Eher gemischte Ergebnisse haben auch die bisherigen Versuche zur **Ozeandüngung** geliefert. Ziel dabei ist es, Meeresalgen durch Ausbringen des für die Pflanzen wichtigen Eisens zum Wachstum und zur Vermehrung anzuregen. Die sich ausbreitenden Algen können durch ihre Fotosynthese große Mengen CO₂ binden. Beim Absterben der Algen sinkt der in ihnen gebundene Kohlenstoff dann auf den Meeresboden ab. Das unter Beteiligung deutscher Forscher im Südozean durchgeführte Experiment LOHAFEX dämpfte 2009 jedoch die Hoffnungen erheblich, CO₂ so schnell und einfach entsorgen zu können. Denn die Algenblüte fiel deutlich geringer aus als bei früheren Eisendüngungsexperimenten in kleinerem Maßstab (**Abb. B**). Weitere Projekte müssen nun klären, wie effektiv die Methode wirklich ist.

Wissenschaftler wie Hauke Schmidt sehen ihre Aufgabe darin, die Vor- und Nachteile des Geo-Engineering offenzulegen und zu beschreiben. Damit geben sie Politikern und anderen Entscheidungsträgern das nötige Wissen an die Hand, um über einen möglichen Einsatz der Verfahren zu entscheiden (**Abb. C**). Aber dürfen solche Verfahren wie die Ozeandüngung oder die Schwefelinjektion überhaupt eingesetzt werden? Wer entscheidet über ihre Nutzung? Müssen alle Staaten der Erde zustimmen oder kann es auch Alleingänge einzelner Länder geben? Wer bezahlt die Maßnahmen und wer haftet für möglicherweise gravierende (Umwelt-) Folgen? →



▲ Ausgewählte Verfahren des Geo-Engineering im Überblick

→ Mit solchen rechtlichen Aspekten des Geo-Engineering beschäftigt sich David Reichwein vom Max-Planck-Institut für ausländisches öffentliches Recht und Völkerrecht. Der Wissenschaftler untersucht, ob die Forschungen und Modelle des Geo-Engineering dem bestehenden Völkerrecht entsprechen. Dabei gilt es zu berücksichtigen, dass Geo-Engineering-Technologien noch keinen Eingang in völkerrechtliche Verträge gefunden haben.

NOTWENDIGE REGELUNGEN

Dennoch gibt es internationale Abkommen, die die unterschiedlichen Technologien zumindest teilweise berühren: „Für den Einsatz von Schwefelsulfaten in der Stratosphäre sind unter anderem die ENMOD-Konvention, das Übereinkommen über weiträumige grenzüberschreitende Luftverunreinigung sowie das Wiener Übereinkommen zum Schutz der Ozonschicht zu beachten“, nennt Reichwein Beispiele. Neben dem Völkervertragsrecht dürfen Geo-Engineering-Maßnahmen zudem dem Völkergewohnheitsrecht nicht widersprechen – auch dabei handelt es sich um rechtlich verbindliche Normen. Demnach ist es beispielsweise jedem Staat untersagt, auf seinem Territorium Aktivitäten zu starten, von denen grenzüberschreitende Umweltbeeinträchtigungen ausgehen. Zudem sind poten-

ziell gefährdete Staaten offiziell zu informieren und zu konsultieren, soweit grenzüberschreitende Umweltbeeinträchtigungen drohen.

Reichwein hat aber nicht nur den rechtlichen Ist-Zustand in Bezug auf das Geo-Engineering ermittelt, er will auch dazu beitragen, dass die Auseinandersetzung über mögliche Maßnahmen künftig auf rechtlich gesicherter Basis ablaufen. Ein Ziel könnte ein verbindlicher Vertrag der Staatengemeinschaft zum Geo-Engineering sein, der alle notwendigen Regeln vorgibt. Einigkeit darüber zu erzielen, hält Reichwein angesichts der möglichen Risiken und Nebenwirkungen aber für mindestens genauso schwierig wie das Aushandeln eines neuen Klimaschutzabkommens.

Ob die bisher existierenden Ideen zum Geo-Engineering jemals in großem Maßstab Realität werden, ist demnach ungewiss. „Ich kann mir kaum vorstellen, dass man sich global auf ein Solar Radiation Management einigen kann, dabei sind immer Gewinner und Verlierer zu erwarten“, meint auch Hauke Schmidt. Sollte es jedoch irgendwann eine Methode geben, CO₂ kostengünstig und mit vertretbaren Nebenwirkungen wieder aus der Atmosphäre zu entfernen, dann werde man diese wohl auch verwenden.

Doch nach Ansicht der meisten Forscher wäre es besser, zur Rettung des irdischen Klimas auch in Zukunft vor allem auf den „Plan A“ zu setzen: die drastische Verminderung der Treibhausgas-Emissionen. Der Grund dafür liegt laut Anders Levermann vom Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung auf der Hand: „Geo-Engineering löst das Klimaproblem nicht, es bekämpft nur die Symptome – und es ist mit Risiken verbunden.“

Schlagwörter: Carbon Dioxid Removal, Solar Radiation Management, Schwefelgase, Wolkenbleichen, CCS-Technologie, Völkerrecht

Lesempfehlung: *Fixing the Sky, Checkered History of Weather and Climate Control*, James Rodger Fleming, Columbia University Press, 2010

Link-Tipps: <http://implicc.zmaw.de/>
<http://www.climate-engineering.uni-hd.de/projects/docu.html>

<http://www.climate-engineering.eu/>

WWW.MAXWISSEN.DE

– der Link zur Forschung für Schüler und Lehrer

Hier finden Sie Hintergrundinformationen und didaktisches Material zu den jeweils zweimal im Jahr erscheinenden Ausgaben von BIOMAX, GEOMAX und TECHMAX. Weitere Exemplare können Sie kostenlos bestellen bei: