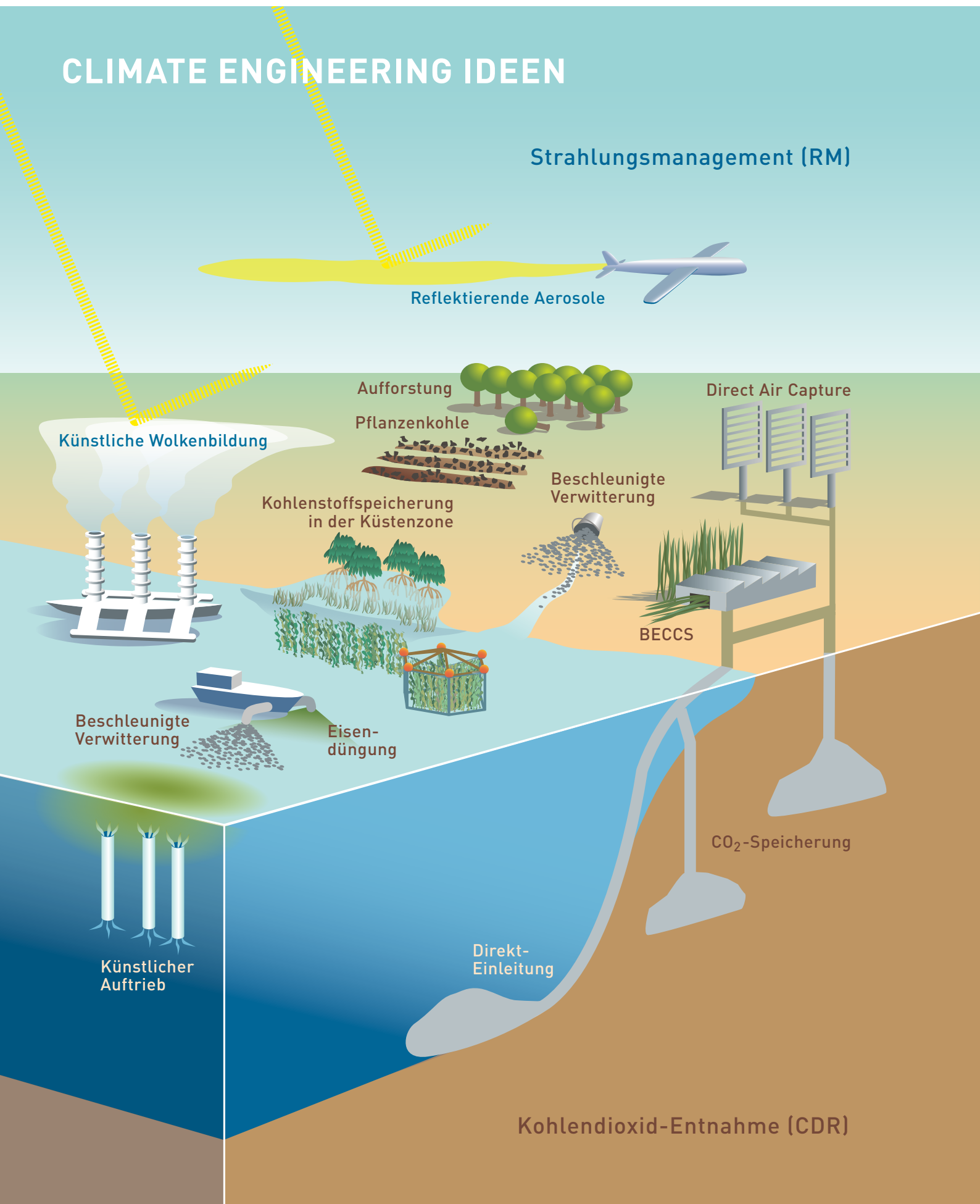


# Climate Engineering und unsere Klimaziele – eine überfällige Debatte

# CLIMATE ENGINEERING IDEEN

## Strahlungsmanagement (RM)





Risks, Challenges,  
Opportunities?

# Climate Engineering und unsere Klimaziele – eine überfällige Debatte

Schwerpunktprogramm 1689 der  
Deutschen Forschungsgemeinschaft

**DFG**

## ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

**BECCS** (Bioenergy with Carbon Capture and Storage) – Bioenergie-CCS

**CCS** (Carbon Capture and Storage) – CO<sub>2</sub>-Abscheidung und -Speicherung

**CDR** (Carbon Dioxid Removal) – Kohlendioxid-Entnahme

**CE** – Climate Engineering

**CO<sub>2</sub>** – Kohlendioxid

**IPCC** (Intergovernmental Panel on Climate Change) – zwischenstaatlicher Ausschuss für Klimaänderungen, Weltklimarat

**NET** (Negative Emission Technologies) – negative Emissionstechnologien

**RM** (Radiation Management) – Strahlungsmanagement

**SDGs** (United Nations Sustainable Development Goals) – Nachhaltige Entwicklungsziele

# INHALT

<b>Vorwort</b> .....	<b>7</b>
<b>Fakten: Kohlendioxid – Ein Abgas verändert die Welt</b> .....	<b>8</b>
EXKURS: Modellierung .....	11
<b>Realitätscheck: Ernst gemeinter Klimaschutz heißt Veränderung</b> .....	<b>14</b>
<b>Handlungsspielräume: Neue Lösungen gesucht</b> .....	<b>18</b>
<b>Methoden des Climate Engineerings:</b>	
<b>Lässt sich die Erderwärmung bremsen, wenn man das Klimasystem gezielt beeinflusst?</b> .....	<b>22</b>
EXKURS: Die verwirrende Vielfalt der Begriffe .....	24
EXKURS: CCS – Kohlendioxid in der Tiefe speichern .....	29
<b>Ethisch und juristisch betrachtet:</b>	
<b>Haben wir das Recht oder sogar die Pflicht, das Klima gezielt zu beeinflussen?</b> .....	<b>42</b>
EXKURS: Climate Engineering auf Probe: Wie ließen sich künftig Feldexperimente durchführen? .....	47
EXKURS: CE-Regulierungen unter dem Dach internationaler Abkommen .....	52
<b>Kontrolle nur begrenzt möglich: Die Krux des chaotischen Klimasystems</b> .....	<b>54</b>
<b>Politischer Diskurs: Eine längst überfällige Debatte</b> .....	<b>60</b>
<b>Ausblick: Wie könnte der Einstieg in eine Welt aussehen, deren Klima gezielt beeinflusst wird?</b> .....	<b>64</b>
Das DFG-Schwerpunktprogramm „Climate Engineering: Risks, Challenges, Opportunities?“ (SPP 1689) .....	68
<b>Wichtige Quellen und Hinweise</b> .....	<b>69</b>
<b>Mitwirkende des SPP 1689</b> .....	<b>70</b>
<b>Danksagung</b> .....	<b>70</b>
<b>Impressum</b> .....	<b>71</b>



„Die reinste Form des Wahnsinns ist es, alles beim Alten zu lassen und gleichzeitig zu hoffen, dass sich etwas ändert.“  
*Albert Einstein*

## VORWORT

Das Bewusstsein, den Klimawandel als konkrete globale gesellschaftliche Herausforderung zu begreifen, und die Bereitschaft, sich der Verantwortung gegenüber heutigen und auch zukünftigen Generationen zu stellen, sind in den letzten Jahren deutlich gewachsen. Das Klimaabkommen von Paris im Herbst 2015 und jüngst der Sonderbericht des Weltklimarats zum 1,5-Grad-Ziel haben die Aufmerksamkeit für die Dringlichkeit und das Interesse an einer tatsächlichen Lösung des Problems weiter erhöht. Die aktuellen Diskussionen zu Energiewende, Kohleausstieg und Elektromobilität zeigen, dass die Emissionsminderung in Politik und Gesellschaft zumindest mitgedacht wird.

Das Abkommen von Paris war ein großer diplomatischer Durchbruch. Mit dem Abkommen haben sich die unterzeichnenden Staaten verpflichtet, ihre Treibhausgasemissionen deutlich zu verringern. Dies hat allerdings bisher noch nicht zu sichtbaren Ergebnissen geführt. Im Gegenteil: 2018 haben die weltweiten Kohlendioxid-Emissionen einen neuen Rekordwert erreicht. Unser für das Erreichen der Klimaziele noch verfügbares Emissionsbudget schrumpft dramatisch – und damit auch die Zeit zu handeln.

Bereits im 5. Sachstandsbericht des Weltklimarats aus dem Jahre 2013 wird in fast allen Szenarien für eine Begrenzung der Erderwärmung auf unter 2 Grad Celsius die Entnahme großer Mengen Kohlendioxid aus der Atmosphäre angenommen. Im Sonderbericht zum 1,5-Grad-Ziel gilt das mittlerweile für alle Szenarien. Eine solche Kohlendioxid-Entnahme gehört zu dem kontrovers diskutierten Themenbereich des Climate Engineerings (CE), das gezielte großräumige Eingriffe in das Klimasystem bezeichnet, mit denen – ergänzend zur Emissionsvermeidung – der durch den Menschen verursachte Klimawandel abgeschwächt werden soll. Climate Engineering umfasst dabei zum einen Ideen, die in den Kohlenstoffkreislauf der Erde eingreifen, um Kohlendioxid aus der Atmosphäre zu entfernen und an Land oder im Ozean zu speichern. Zum anderen wird der Begriff auch für Vorschläge verwendet, die direkt den Strahlungshaushalt der Erde beeinflussen sollen, zum Beispiel indem ein Teil der auf die Erde auftreffenden Sonnenstrahlung abgeschirmt und dadurch die Erwärmung abgeschwächt werden soll. Falls der weitere Anstieg der

Kohlendioxid-Konzentration in der Atmosphäre nicht schnell genug gestoppt werden sollte, könnten – so die Hoffnung der Befürworter dieser Idee – solche Eingriffe in den Strahlungshaushalt dazu beitragen, die Temperaturziele möglicherweise trotzdem noch zu erreichen.

Das Spektrum der angedachten CE-Methoden und ihrer potenziellen Wirkungsweisen und Nebenwirkungen ist sehr breit. Eine pauschale Bewertung von Climate Engineering ist daher wenig sinnvoll. Mittlerweile setzt sich die Erkenntnis durch, dass eine Begrenzung der Erderwärmung auf deutlich unter 2 Grad Celsius allein durch Emissionsreduktion nicht mehr erreichbar sein dürfte. Das Wissen um die Gefahren eines ungebremsten Klimawandels und die Trägheit von Politik und Gesellschaft, die einen schnellen Ausstieg aus der Nutzung fossiler Energieträger verhindert, lassen es daher unerlässlich erscheinen, sich auch mit den Möglichkeiten des Climate Engineering intensiver auseinanderzusetzen.

Vor diesem Hintergrund wurde aus einer Verantwortungsinitiative besorgter Wissenschaftler heraus im Jahr 2013 das von der Deutschen Forschungsgemeinschaft über sechs Jahre geförderte Schwerpunktprogramm zur Bewertung von Climate Engineering (SPP 1689) gegründet. Die vorliegende Broschüre ist im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit dieses Schwerpunktprogramms entstanden. Sie soll dazu beitragen, eine ergebnisoffene und durch den besten Stand des Wissens informierte gesellschaftliche und politische Debatte über die Möglichkeiten und Risiken der verschiedenen Ideen des Climate Engineerings zu befördern. Sie macht auch deutlich, dass Climate Engineering eine umgehende massive Reduktion der Kohlendioxid-Emissionen keinesfalls ersetzen kann. Die Broschüre ist keine wissenschaftliche Fachpublikation, sondern ein Beitrag zu einer transparenten Debatte über Strategien zum Erreichen der versprochenen Klimaziele. Es ist zu hoffen, dass damit gewissenhafte gesellschaftliche Entscheidungen unterstützt werden können, mit denen die Folgen menschlicher Eingriffe in das Klimasystem in einem für Gesellschaft und Natur verantwortbaren Rahmen gehalten werden können.

Andreas Oschlies

Sprecher SPP 1689 „Climate Engineering“

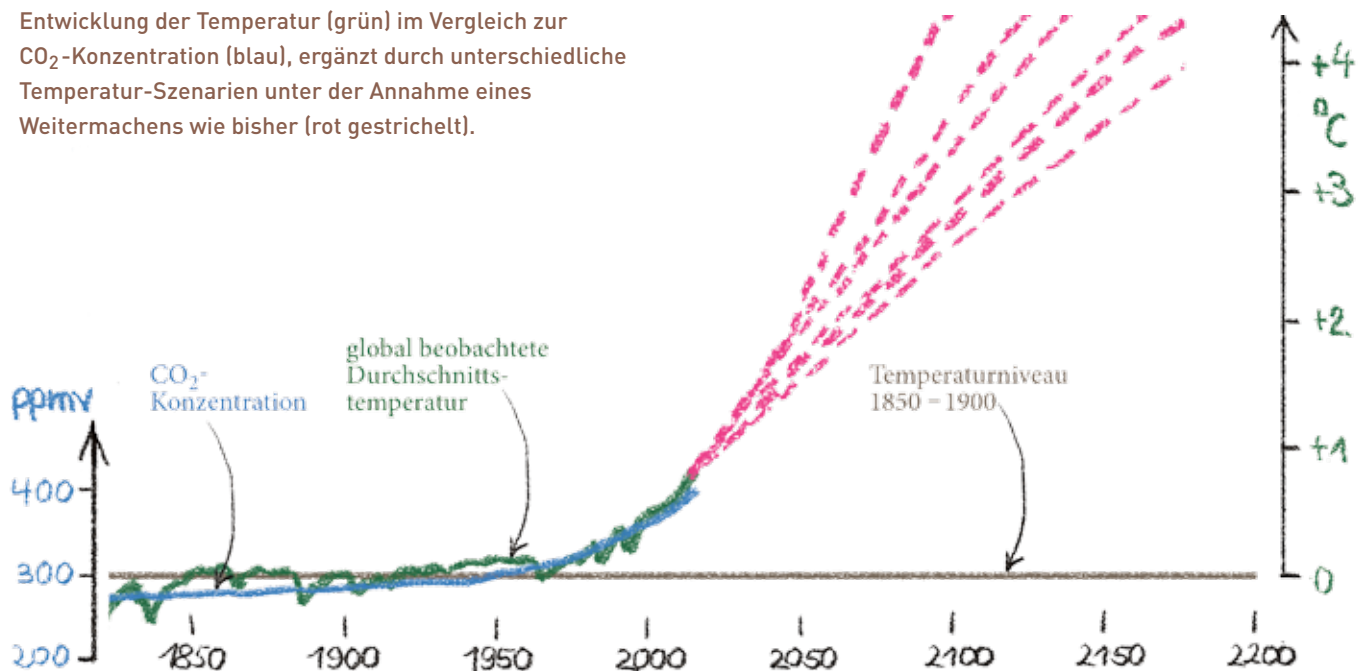


Verkehr, Elektrizität, Nahrungsmittel: Kohlendioxid entsteht bei allem, was modernen Menschen das Leben erleichtert. Dabei können wir das Treibhausgas weder sehen noch riechen oder schmecken. Von großen Teilen der Bevölkerung unbemerkt reichert es sich in der Atmosphäre an und heizt der Erde mächtig ein.





Entwicklung der Temperatur (grün) im Vergleich zur CO<sub>2</sub>-Konzentration (blau), ergänzt durch unterschiedliche Temperatur-Szenarien unter der Annahme eines Weitermachens wie bisher (rot gestrichelt).



## FAKTEN:

# KOHLENDIOXID – EIN ABGAS VERÄNDERT DIE WELT

Die Menschheit hat seit Beginn des Industriezeitalters vor 270 Jahren mehr als 2.200 Milliarden Tonnen Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) in die Atmosphäre entlassen. Diese Zahl weckt allerdings kaum ein echtes Problembewusstsein. Man sieht das Treibhausgas nicht, schmeckt es nicht, riecht es nicht. Deshalb fällt es den meisten Menschen im Alltag auch nicht schwer, das Thema zu ignorieren. Niemand bemerkt beim Arbeiten oder in freier Natur, in welchem Ausmaß die Kohlendioxid-Konzentration in der Atmosphäre steigt.

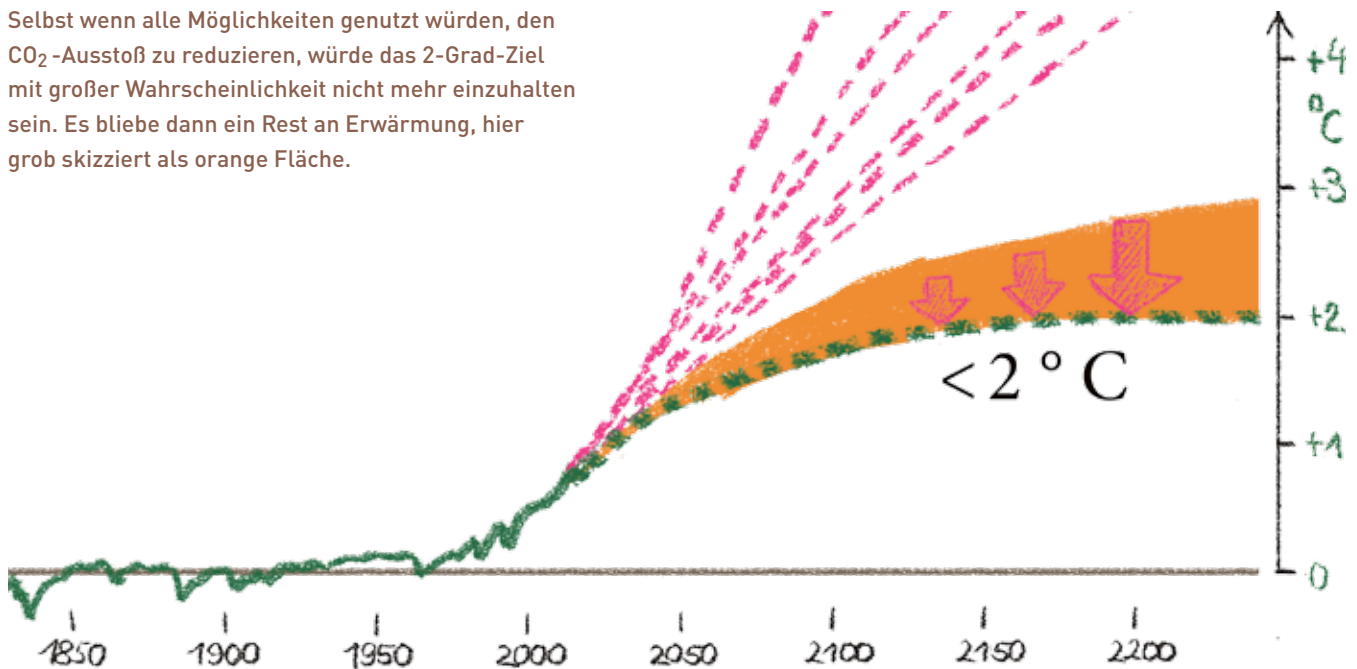
Immer offensichtlicher werden dagegen die Folgen, welche der anhaltende Kohlendioxid-Ausstoß nach sich zieht. Das Abgas reichert sich in der Erdatmosphäre an und bremst die Selbstkühlungsmechanismen des Planeten. Die Erdoberfläche kann große Anteile der einfallenden Sonnenenergie nicht mehr so einfach als Infrarotenergie in das Weltall zurückstrahlen.

Die Wärme bleibt stattdessen im Erdsystem gefangen. Auf diese Weise ist die globale mittlere Oberflächentemperatur im zurückliegenden Jahrhundert um etwa 1 Grad Celsius gestiegen. In Deutschland fiel die Erwärmung sogar noch höher aus: Im Zeitraum von 1881 bis 2014 stieg die Jahresdurchschnittstemperatur um 1,3 Grad Celsius. Deutliche Spuren hat der Klimawandel bereits an der deutschen Nord- und Ostseeküste hinterlassen. Der Wasserpegel beider Meere ist in den zurückliegenden 100 Jahren um 10–20 Zentimeter gestiegen, weil die Gletscher und Eisschilde der Erde schmelzen und sich das wärmer werdende Wasser ausdehnt.

### Eine grenzenlose Herausforderung

Ähnliche Berichte kommen inzwischen aus fast allen Teilen der Welt: In Alaska planen die Bewohner von Insel- oder Küstendörfern wie Shishmaref und Newtok den Umzug ihrer Gemeinden, weil der arktische Dauerfrostboden, auf dem ihre Häuser stehen, auftaut und vom Meer davongespült wird. Der Millionenmetropole Kapstadt ging nach langer Trockenheit 2018 fast das Trinkwasser aus. Der Golfstrom schwächt sich

Selbst wenn alle Möglichkeiten genutzt würden, den CO<sub>2</sub>-Ausstoß zu reduzieren, würde das 2-Grad-Ziel mit großer Wahrscheinlichkeit nicht mehr einzuhalten sein. Es bliebe dann ein Rest an Erwärmung, hier grob skizziert als orange Fläche.



ab, die Gletscher der Polarregionen und Hochgebirge schmelzen, und im größten Korallenriff der Erde, dem australischen Great Barrier Reef, starben in den zwei warmen Sommern 2016 und 2017 rund die Hälfte aller Korallen an Hitzestress. Niedrig gelegene Inselstaaten wie Kiribati und Tuvalu kämpfen derweil gegen die Folgen des Meeresspiegelanstiegs. Hier und anderswo zeigt sich: Der Klimawandel kennt keine Staatsgrenzen. Er ist ein globales Problem, von dessen Folgen die verschiedenen Nationen bislang in einem unterschiedlichen Maße betroffen sind, dessen Ursachen und Ausmaß sie aber nur gemeinsam bekämpfen können.

Aus diesem Grund versucht die internationale Staatengemeinschaft seit den 1990er-Jahren, ein internationales Regelwerk zur Begrenzung der Treibhausgas-Emissionen auszuhandeln. Ein wichtiger Durchbruch gelang dabei im Dezember 2015 auf der 21. Internationalen Klimakonferenz in Paris, als sich Regierungsvertreter aus 175 Ländern auf das Ziel einigten, den Anstieg der globalen Durchschnittstemperatur auf deutlich unter 2 Grad Celsius zu begrenzen, bestenfalls sogar auf 1,5 Grad Celsius. Die Regierungen stimmten damit einer drastischen Reduzierung der Treibhausgase zu. Fast alle Nationen haben im Anschluss an Paris nationale Klimaschutzziele definiert. Ob es der Staatengemeinschaft aber tatsächlich gelingen wird, diese Ziele politisch umzusetzen, hängt davon ab, dass die

einzelnen Staaten ihren Worten auch Taten folgen lassen und effektive Maßnahmen zur Emissionsvermeidung einführen.

### Der einzige Ausweg: ein emissionsneutrales Leben

Kohlendioxid ist ein ausgesprochen langlebiges Treibhausgas, das als ungewolltes Abfallprodukt bei nahezu allem entsteht, was unser Leben erleichtert – im Luft-, Straßen- und Güterverkehr, beim Verbrennen von Kohle, Erdöl oder Erdgas, in der Landwirtschaft, im Baugewerbe und bei der Produktion sämtlicher Konsumgüter. Einmal freigesetzt, kann Kohlendioxid die Temperaturkurve der Erde über Jahrhunderte in die Höhe treiben. Nur ein Beispiel: 1.000 Milliarden Tonnen Kohlendioxid in der Atmosphäre haben das Potenzial, die Erde um bis zu 0,7 Grad Celsius zu erwärmen. Klimaforscher versuchen deshalb, die Gesamtsumme aller bisher ausgestoßenen Treibhausgase zu bestimmen, um im Anschluss zu berechnen, wie viel Kohlendioxid noch freigesetzt werden darf, bis eine bestimmte Temperaturgrenze erreicht wird.

Um das 1,5-Grad-Ziel zu erreichen, dürften – so der Weltklimarat (IPCC) – ab 2018 etwa 420 Milliarden Tonnen Kohlendioxid emittiert werden. 1.200 Milliarden Tonnen wären es, wenn die Temperatur nicht über 2 Grad Celsius steigen soll. Die gegenwärtigen Kohlendioxid-Emissionen liegen bei gut 40 Milliarden Tonnen pro Jahr. Damit wäre das Guthaben

für das 1,5-Grad-Ziel schon vor 2030 aufgebraucht, jenes für das 2-Grad-Ziel im Zeitraum vor 2050. Einige wissenschaftliche Studien geben der Menschheit etwas mehr, andere etwas weniger Zeit, ihre Kernbotschaft ist jedoch dieselbe: Soll die globale Erwärmung gestoppt werden, muss es gelingen, die Kohlendioxid-Emissionen auf null zu reduzieren – auch wenn die Wissenschaft nicht auf das Jahr genau beziffern kann, wie viel Zeit für einzelne Temperaturziele noch bleibt.

### Die Lasten gerecht verteilen

Eine wichtige Frage lautet, wie dieser Schritt gelingen soll, ohne die wirtschaftliche und gesellschaftliche Entwicklung weltweit zu gefährden. Tatsache ist, dass sich die Erde nicht

gleichmäßig erwärmt und der Klimawandel die Nationen im unterschiedlichen Ausmaß trifft. Beispielsweise spüren viele Schwellen- und Entwicklungsländer in Äquatornähe die Folgen der Erwärmung heute schon in einem viel größeren Ausmaß als viele Industrienationen im Norden. Lange Dürreperioden, Ernteausfälle und Hungersnöte sind nur drei von vielen negativen Auswirkungen. Es gibt aber auch Regionen, die vom Temperaturanstieg profitieren. Vorteilhaft wirkt sich der Klimawandel beispielsweise für die Fischer Grönlands aus. Ihnen gehen inzwischen viele jener beliebten Speisefische ins Netz, die aufgrund steigender Wassertemperaturen aus den mittleren Breiten des Atlantischen Ozeans in den Norden abgewandert sind. Überwiegen aber wird die Zahl der Verlierer.

## EXKURS

### MODELLIERUNG

#### Wie viel Zeit bleibt denn noch?

Fünf Jahre, 30 Jahre oder doch viel mehr? Eine eindeutige Antwort auf die Frage „Wie viel Zeit bleibt der Menschheit noch, um die Erderwärmung zu stoppen?“ fehlt. Das liegt zum einen an der natürlichen Variabilität des Klimasystems und an den Unsicherheiten über die Entwicklung der anthropogenen Emissionen. Zum anderen müssen Forscher die Zukunft der Erde simulieren, um Vorhersagen über die Entwicklung des Klimas treffen zu können. Diese mit mathematischen Computermodellen durchgeführten Simulationen enthalten jedoch Unsicherheiten.

#### Was ist Modellierung?

Ein Computermodell kann man sich als eine gigantische Ansammlung mathematischer Formeln vorstellen. Diese Formeln sind derart miteinander verknüpft, dass sie das Zusammenspiel verschiedener Komponenten eines Systems – sei es das Klimasystem der Erde oder die Weltwirtschaft – auf Basis naturwissenschaftlicher Gesetze und ökonomischer Annahmen in Raum und Zeit simulieren.

Einfache Modelle in der Klimaforschung beschreiben die Abläufe in einem Teilbereich des Klimasystems, so zum Beispiel die Meeresströmungen. Gekoppelte Klimamodelle sind dage-

gen in der Lage, die Abläufe und Wechselwirkungen zwischen mehreren Teilbereichen abzubilden. Sogenannte Erdsystemmodelle enthalten darüber hinaus Module zur Beschreibung der Landvegetation, der Böden, der marinen Ökosysteme oder der biogeochemischen Stoffkreisläufe.

Wirtschaftswissenschaftler arbeiten mit Modellen, die das Verhalten von Individuen, Haushalten, Unternehmen oder Regierungen in unterschiedlichen Zusammenhängen beschreiben. So lässt sich beispielsweise erforschen, wie bestimmte Akteure reagieren, wenn Benzin und Diesel deutlich stärker besteuert werden würden.

Computermodelle sind mittlerweile ein unverzichtbares Werkzeug vieler Forschergruppen geworden – in den Naturwissenschaften ebenso wie in den Sozial- und Wirtschaftswissenschaften. Die verschiedenen Modelltypen werden zunehmend auch über Disziplingrenzen hinaus miteinander gekoppelt. Sie eröffnen Wissenschaftlern die Möglichkeit, „Was-wäre-wenn“-Experimente in einer virtuellen Welt durchzuführen, einschließlich solcher, die in der Realität gar nicht durchführbar wären. Klimaforscher können auf diese Weise beispielsweise das gesamte Gletschereis der Erde schmelzen lassen, um zu untersuchen, wie hoch und schnell der Meeresspiegel durch eine solche Gletscherschmelze steigen würde.

Durch Simulationen lassen sich also idealisierte Szenarien berechnen und gegebenenfalls als Projektion einer möglichen Zukunft darstellen, Hypothesen überprüfen oder komplexe Sachzusammenhänge darstellen, für die Messungen, Umfragen oder Experimente nicht genügen oder nicht durchführbar sind. In vielen Fällen sind Modellierungen sogar das einzige Werkzeug, mit dem Teilprozesse eines komplizierten Systems erforscht werden können – beispielsweise bei der Simulation eines technischen Eingriffs in das Klima der Erde. Ein solcher Testlauf ist nur im Modell gefahrlos möglich.

### Auf welche Modelle bezieht sich der Weltklimarat?

Die vom Weltklimarat verwendeten Szenarien zukünftiger Treibhausgas-Emissionen und Treibhausgas-Konzentrationen in der Atmosphäre beruhen auf sogenannten integrierten Bewertungsmodellen (engl.: Integrated Assessment Models). Diese verbinden Klimamodelle mit Modellen, die zum Beispiel das Wirtschafts- und Bevölkerungswachstum sowie den Energieverbrauch und die Landnutzung beschreiben.

Um die Auswirkungen der Treibhausgas-Szenarien auf das Klima zu verstehen, bezieht sich der Weltklimarat auf Erdsystemmodelle. Diese werden entweder durch die Szenarien für Emissionen und Landnutzung aus den integrierten Bewertungsmodellen angetrieben oder direkt durch deren Treibhausgas-Konzentration und projizieren dann die Konsequenzen für das Klima- und Erdsystem. Sie sagen zum Beispiel voraus, wie sich der Klimawandel auf die Eisschilde, den Wasserkreislauf, den Ozean oder die Vegetation der Erde auswirkt.

### Wie genau sind die Modellergebnisse?

Trotz aller Fortschritte schaffen es die Modelle bislang oft noch nicht, die jeweiligen Abläufe und Wechselwirkungen in einem System bis ins Detail abzubilden – aus drei Gründen:

→ Erstens ist die Höhe zukünftiger anthropogener Treibhausgas-Emissionen unsicher, denn die Entwicklung der Weltgesellschaft lässt sich nur schwer abschätzen. Sich wandelnde Wertvorstellungen, politische Entwicklungen oder auch Sprünge in der technologischen Entwicklung lassen sich nicht vorhersagen, können aber die Höhe der Treibhausgas-Emissionen deutlich beeinflussen. Um unterschiedliche mögliche Entwicklungen der Weltgesellschaft zu berücksichtigen, werden daher auch verschiedene Emissionsszenarien entwickelt. Dieses Vorgehen ermöglicht es, bestimmte Wenn-Dann-Aussagen zu treffen, nicht aber die eine Zukunft vorherzusagen.

→ Zweitens lassen sich auch prinzipiell gut bekannte und verstandene Prozesse und Variablen in den Computermodellen nur vereinfacht darstellen, da sie auf so kleinen Skalen wirken, dass sie von der räumlichen und zeitlichen Auflösung der Modelle nicht komplett erfasst werden können (z. B. Wolken). Ihre Effekte können daher nicht vom Modell berechnet werden, sondern müssen durch Näherungsverfahren abgeschätzt werden. Wissenschaftler sprechen an dieser Stelle von Parametrisierungen. Sie sind ein Hauptgrund für Unsicherheiten in der Modellierung.

→ Drittens fehlt in vielen Bereichen noch ein genaues Verständnis wichtiger natürlicher Prozesse. In der Klimamodellierung zum Beispiel sind vor allem kurzfristige Schwankungen des Klimas und die ihnen zugrunde liegenden Rückkopplungen zwischen Komponenten wie der Atmosphäre und dem Ozean noch nicht gut verstanden.

Das heißt: Die simulierte Welt ist kein perfektes Abbild der Realität. Modellierungen – nicht nur in der Klima- und Erdsystemforschung – beinhalten immer Vereinfachungen, vernachlässigen möglicherweise wichtige Prozesse und Zusammenhänge und hängen von nicht genau bekannten Anfangs- und Randbedingungen ab. Dadurch ist jede Modellsimulation mit Unsicherheiten behaftet, die bei einer Interpretation der Ergebnisse berücksichtigt werden müssen. Diese Unsicherheiten sind auch der Grund, weshalb es Klimaforschern nicht möglich ist, genau zu sagen, wie viel Kohlendioxid wir noch emittieren dürfen oder wie viel Zeit uns noch bleibt, das 1,5-Grad-Ziel zu erreichen.

Verringert sich aufgrund solcher Unsicherheiten auch der Handlungsdruck? Auf keinen Fall! Zum einen sind die Hinweise auf die großen Risiken des Klimawandels für die Menschheit überwältigend eindeutig; zum anderen können Unsicherheiten nicht als Entschuldigung für Untätigkeit genutzt werden. Im Alltag gehen wir Menschen Unsicherheiten offensiv an. Das heißt, wir lassen uns von ihnen nicht aufhalten, sondern wägen ab oder treffen versicherungstechnische Vorkehrungen für Extremereignisse wie Unfälle, Diebstahl oder Brände. Unsicherheiten sind Bestandteil des Lebens und als solche nicht negativ – wir müssen nur mit ihnen umzugehen wissen. ♦

**Weitermachen wie bisher ist eine der schlechtesten Optionen. Vielmehr bedarf es einer breiten öffentlichen und vor allem ehrlichen Diskussion zur Frage, ob die Weltgemeinschaft in Sachen Klimaschutz auch zu weitreichenden Entscheidungen bereit ist.**

Im Zuge des Klimawandels könnten große Regionen der Welt für Menschen unbewohnbar werden. Er gefährdet den Anbau von Nutzpflanzen in vielen Teilen der Erde und auf diese Weise auch den Weltfrieden. Die Staatengemeinschaft steht daher nicht nur vor der Herausforderung, möglichst schnell Wege in eine kohlendioxid-neutrale Zukunft zu finden. Sie muss es auch schaffen, die Lasten und Kosten des gesellschaftlichen Wandels hin zu einer emissionsneutralen Gesellschaft sowie die Kosten der Anpassung an den Klimawandel gerecht zu verteilen. Anderenfalls wird es nicht gelingen, die nachhaltigen Entwicklungsziele der Vereinten Nationen (SDGs, Sustainable Development Goals) zu erreichen. Zu diesen zählen unter anderem die Armutsbekämpfung sowie der Zugang zu ausreichend Nahrung, zu sauberem Wasser und zu nachhaltiger und verlässlicher Energie für alle Bürger der Erde. Klimaschutz und Entwicklung sind eng miteinander verzahnt.

### Machen 0,5 Grad Celsius einen Unterschied?

Angesichts der politischen Diskussionen um das Pariser Klimaabkommen stellt sich die Frage, welchen Unterschied es eigentlich macht, die globale Erwärmung auf 1,5 anstatt auf 2 Grad Celsius zu begrenzen. Ist es sinnvoll, das ehrgeizigere Ziel zu verfolgen?

Der Weltklimarat legte 2018 in seinem Sonderbericht zum 1,5-Grad-Ziel die Unterschiede offen. So würde in einer Welt, die sich bis 2100 nur um 1,5 Grad Celsius erwärmt, die Meereisdecke des Arktischen Ozeans im Sommer seltener vollständig abschmelzen als unter 2-Grad-Bedingungen. Der Meeresspiegelanstieg würde bei einer Erwärmung um 1,5 Grad deutlich geringer ausfallen als bei 2 Grad. Damit wären die Anpassungschancen für Menschen und Ökosysteme in Küstengebieten und auf kleinen Inseln größer. Die Versauerung der Ozeane würde bei 1,5 Grad in einem geringeren Maße zunehmen und die Lebensgemeinschaften der Meere weniger belasten. Beispielsweise könnten bei einer 1,5 Grad wärmeren Welt bis zu 30 Prozent aller Korallenriffe überleben, bei 2 Grad würden sie mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit komplett verschwinden.

Von Relevanz wäre der Unterschied von 0,5 Grad Celsius auch für den Erhalt von Lebensräumen an Land und das Ausmaß an Artenverlusten. Über Land würden die Tageshöchsttemperaturen weniger dramatisch ansteigen, die Gefahr von Wetterextremen wie Starkregen oder Hitzeperioden wäre geringer und der Welt bliebe ein enormer wirtschaftlicher Schaden erspart. Es lohnt sich also aus vielen Gründen, das ambitioniertere der beiden Klimaziele zu verfolgen. Zurzeit sind wir aber selbst vom 2-Grad-Ziel noch weit entfernt. Ohne konkrete Maßnahmen, die über die bisherigen Versprechungen der einzelnen Länder hinausgehen, steuern wir derzeit eher auf eine mehr als 3 Grad wärmere Welt zu. ♦

### KOMPAKT

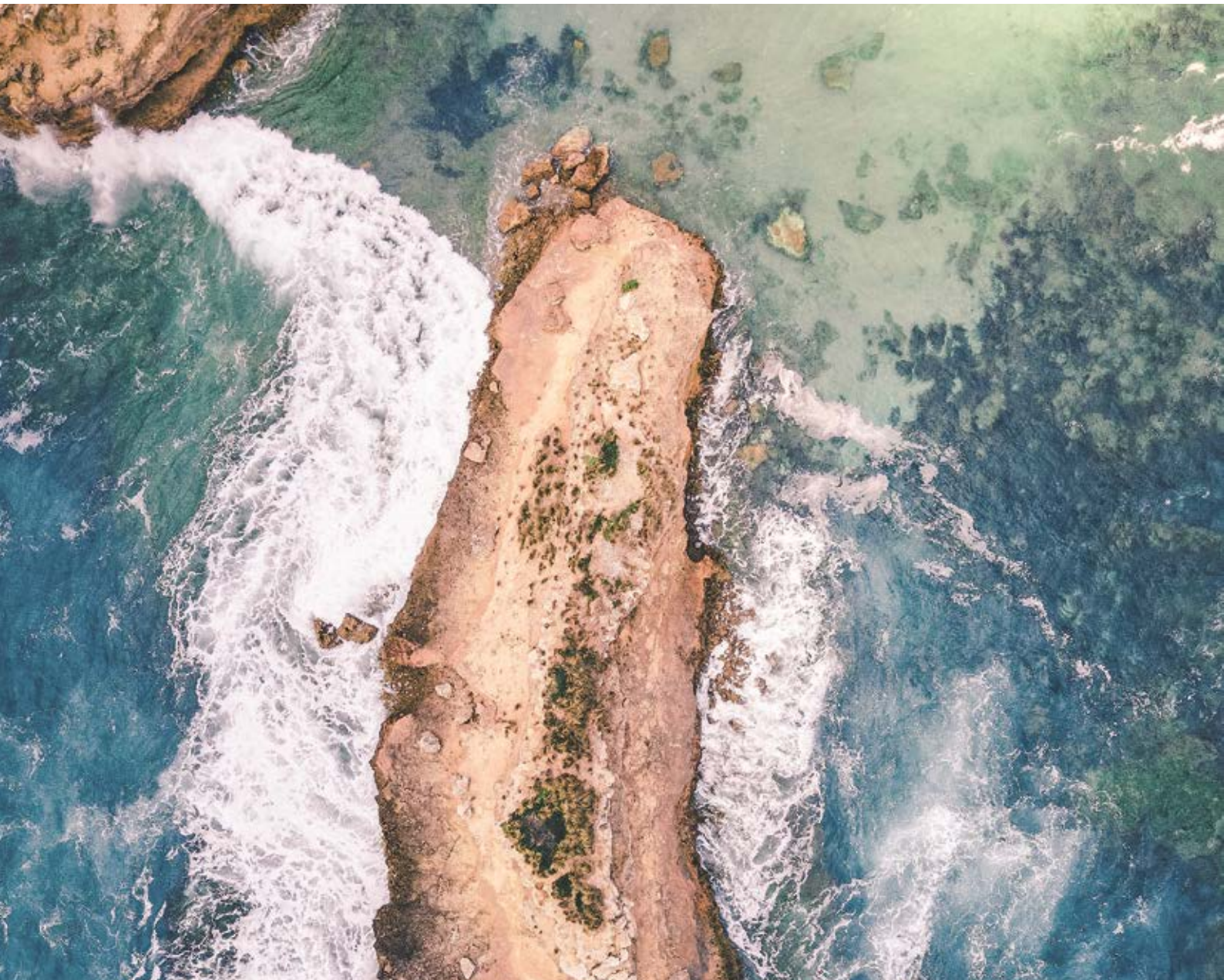
Seit Beginn der Industrialisierung steigt die Kohlendioxid-Konzentration in der Erdatmosphäre kontinuierlich an und verstärkt die Erwärmung der Erde. Im 20. Jahrhundert ist die globale Oberflächentemperatur um 1 Grad Celsius gestiegen – Trend anhaltend.

→ Die Folgen der Erderwärmung sind inzwischen in allen Teilen der Welt zu spüren und führen u. a. zu einer Zunahme der Wetterextreme und zu einem Anstieg des Meeresspiegels. Die Folgen der Erderwärmung bedrohen Abermillionen Menschen.

→ Auf der Pariser Klimakonferenz haben sich 175 Länder auf das Ziel geeinigt, die Erderwärmung bis zum Jahr 2100 auf deutlich unter 2 Grad Celsius, bestenfalls sogar auf 1,5 Grad Celsius zu begrenzen. Dazu muss es spätestens in der zweiten Hälfte des Jahrhunderts gelingen, in der Gesamtbilanz das Kohlendioxid von bisher 40 Milliarden Tonnen pro Jahr auf null zu reduzieren.

→ Die Auswirkungen und Folgekosten des Klimawandels fallen weniger dramatisch aus, wenn es gelingt, die Erderwärmung auf 1,5 anstatt auf 2 Grad Celsius zu begrenzen.

→ Um eine nachhaltige Entwicklung voranzutreiben und den sozialen Frieden (z. B. Vermeidung großer Fluchtbewegungen) zu wahren, müssen die Kosten und Lasten einer notwendigen Anpassung und eines notwendigen gesellschaftlichen Wandels gerecht verteilt werden.



Bis zum Jahr 2040 wird der weltweite Energiebedarf um 30 Prozent anwachsen. Gleichzeitig muss die Menschheit ihre Treibhausgas-Emissionen bis zur Mitte des Jahrhunderts auf null reduzieren, wenn die Erderwärmung nicht über 2 Grad Celsius steigen soll. Um beide Ziele zu erreichen, bedarf es tiefgreifender Maßnahmen.

## REALITÄTSCHECK: ERNST GEMEINTER KLIMASCHUTZ HEISST VERÄNDERUNG

China, Australien und Indien gehen voran. Im Jahr 2017 investierten diese Länder mehr in den Ausbau erneuerbarer Energien als in den Neubau von Kohle- oder Gaskraftwerken. Strom aus regenerativen Quellen wie Solar- und Windkraft, Biogasanlagen und kleineren Wasserkraftwerken macht inzwischen 12,1 Prozent der weltweit erzeugten Strommenge aus – Tendenz steigend, auch weil die Preise für Photovoltaikanlagen, Windturbinen und Lithiumbatterien fallen. Energiemarkt-Experten sagen voraus, dass es im Jahr 2030 in manchen Regionen der Welt billiger sein wird, Solaranlagen zu installieren, als Kohle in alternden Kraftwerken zu verbrennen.

Dennoch sind diese Fortschritte in Hinblick auf die Treibhausgas-Bilanz der Erde nicht mehr als der berühmte Tropfen auf den heißen Stein. 81 Prozent des aktuell produzierten Stroms stammen noch immer aus fossilen Quellen. Hinzu kommen die Emissionen, die durch den Verkehr, die Industrie sowie die Landwirtschaft freigesetzt werden. Ihre Gesamtsumme steigt seit Jahrzehnten kontinuierlich an.

Im Klimaabkommen von Paris 2015 haben sich die unterzeichnenden Staaten verpflichtet, ihre Treibhausgas-Emissionen durch nationale Klimaschutzbeiträge deutlich zu reduzieren oder auf geringem Niveau zu halten. Diplomatisch war dieses Versprechen ein großer Erfolg. Analysen der Vereinten Nationen zeigen aber, dass die angekündigten nationalen Klimaschutzbeiträge bei Weitem nicht ausreichen, um das 2-Grad-Ziel – geschweige denn das 1,5-Grad-Ziel – zu erreichen. Auch wenn alle angekündigten Versprechen zur Emissionsreduktion eingelöst werden würden, steuert die Welt zurzeit auf eine Erwärmung von 2,2 bis 3,6 Grad Celsius bis zum Jahr 2100 zu.

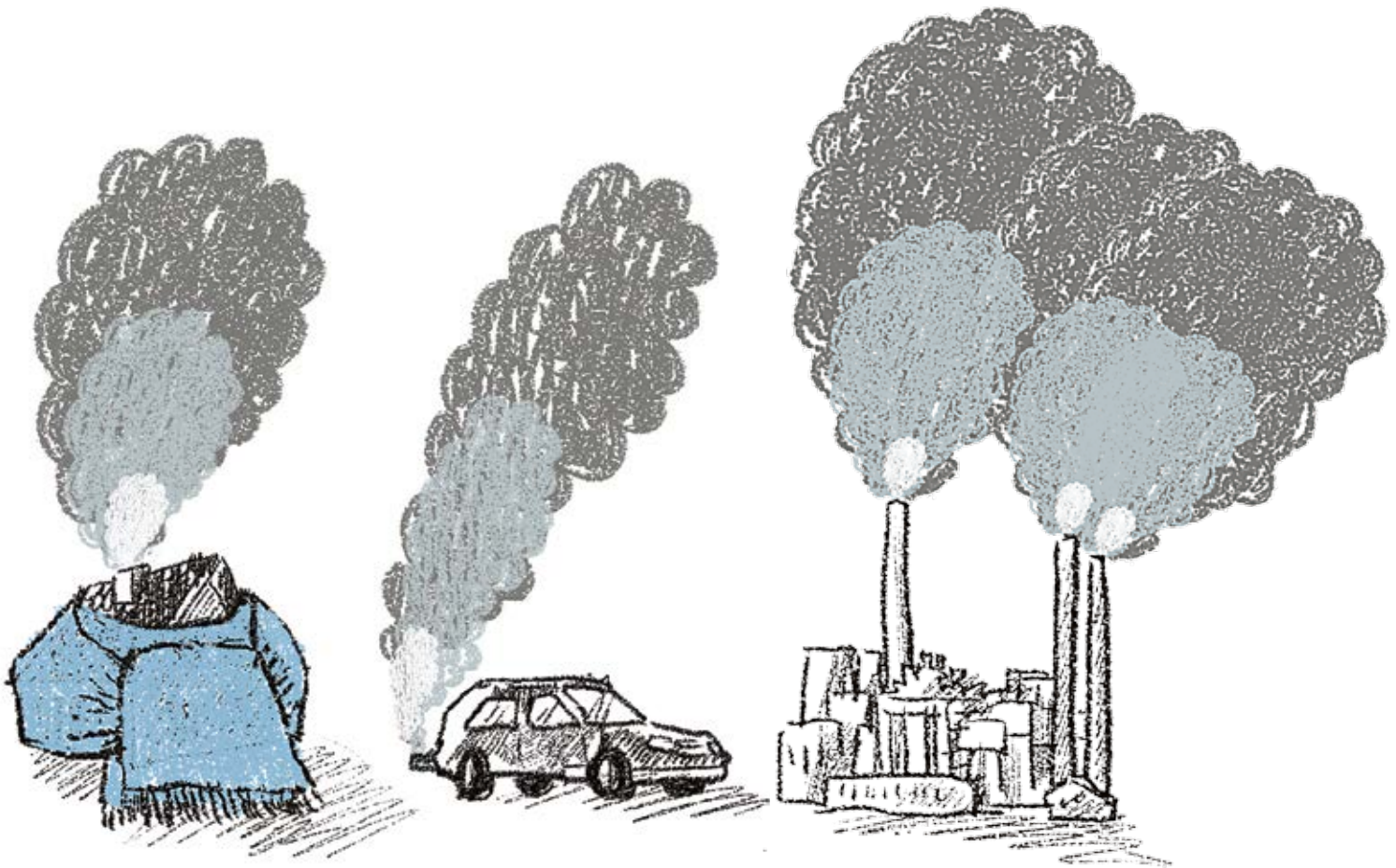
### Von 100 auf null innerhalb kürzester Zeit – eine Herkulesaufgabe

Angesichts dieser Tatsache stellt sich die Frage: Ist denn selbst das 2-Grad-Ziel überhaupt noch zu erreichen? Theoretisch ja, wenn es der Staatengemeinschaft gelingt, ihre Gesamtbilanz von Kohlendioxid in der zweiten Hälfte des Jahrhunderts auf null herunterzufahren. Das ist eine Herkulesaufgabe, wenn man bedenkt, dass nicht nur der Strombedarf weiter ansteigen wird. Die Internationale Energieagentur in Paris sagt voraus, dass im Jahr 2040 weltweit rund 30 Prozent mehr Strom verbraucht werden wird als heute. China beispielsweise wird demnach allein so viel Strom für den Betrieb von Klimaanlage benötigen, wie Japan heute insgesamt verbraucht. Noch größer fällt der erwartete Zuwachs in der Lebensmittelproduktion aus, die schon heute rund 30 Prozent aller Treibhausgas-Emissionen verursacht.

Einige Wissenschaftler haben vor diesem Hintergrund einen Maßnahmenkatalog entwickelt, mit dem die Klimaziele allein durch die Emissionsreduktion erreicht werden könnten. Demzufolge wäre das Pariser Klimaziel realistisch, wenn unter anderem in kürzester Zeit

- der Stromsektor vollständig auf erneuerbare Energiequellen umgestellt wird,
- Fahrzeuge, Maschinen und Heizungssysteme elektrifiziert werden,
- Flugzeuge und Schiffe mit kohlendioxid-neutral erzeugtem Treibstoff fliegen bzw. fahren,





- in Industrie und Haushalten nur noch moderne, energieeffiziente Geräte und Materialien zum Einsatz kommen,
- die Lebensmittelproduktion deutlich optimiert wird,
- die Erdbevölkerung deutlich weniger Fleisch verzehrt und keine Nahrungsmittel mehr verschwendet sowie ihr Mobilitätsverhalten verändert,
- die internationale Staatengemeinschaft im Rahmen einer gemeinsamen Strategie eine effektive Klimapolitik betreibt.

### Kohlendioxid braucht einen Preis

Die meisten Wirtschaftswissenschaftler sind sich einig, dass das Emittieren von Kohlendioxid Geld kosten muss. Der einfachste und insgesamt kostengünstigste Weg zu mehr Klimaschutz wäre demnach die Einführung einer Kohlendioxid-Steuer. Bisher gibt es weltweit kaum wirtschaftliche Anreize, den Ausstoß von Treibhausgas-Emissionen zu reduzieren. Das Abfallprodukt Kohlendioxid und andere Treibhausgase werden rund um den Globus kostenlos und damit auch bedenkenlos in die Atmosphäre entsorgt. Eine Kohlendioxid-Steuer würde dies ändern und Anreize setzen, Kohlendioxid zu reduzieren – zum einen durch Verhaltensänderungen, zum anderen durch technische Innovationen. Die Steuereinnahmen wiederum

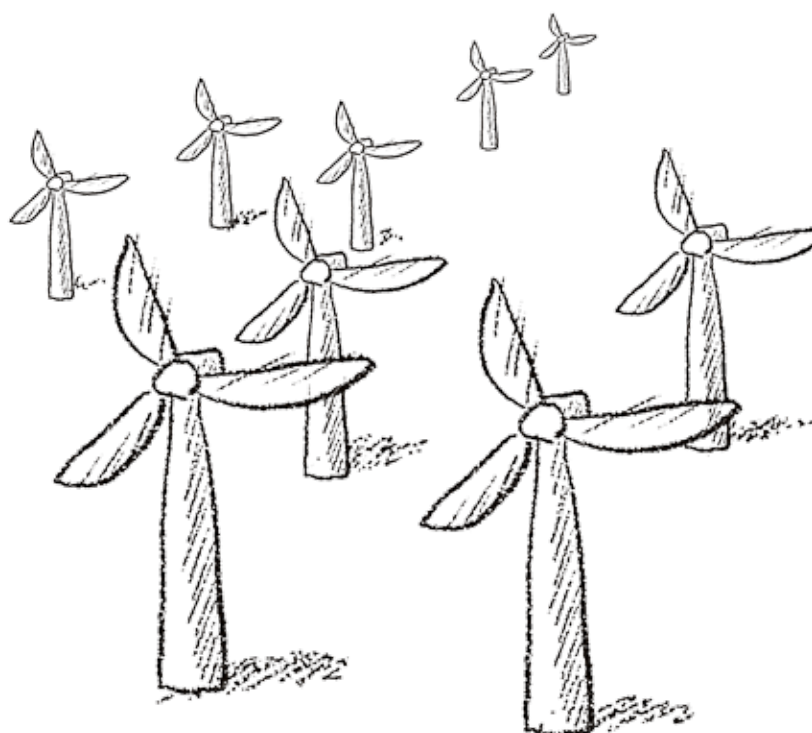
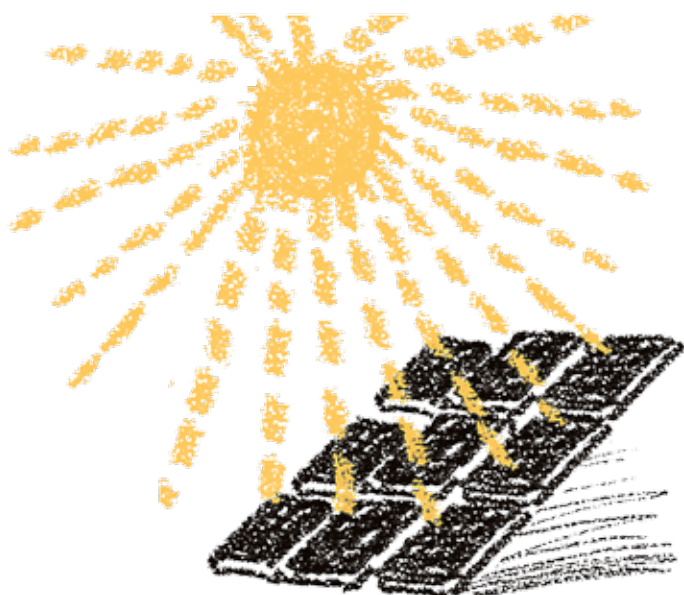
könnten die Staaten nutzen, um die Verbraucher einkommensneutral zu entlasten oder um die Anpassung an den Klimawandel zu finanzieren. Praktisch alle anderen Vorschläge für mehr Klimaschutz erscheinen kompliziert oder gesamtwirtschaftlich kostspielig. Ein hinreichend hoher Preis auf Treibhausgas-Emissionen wäre dagegen eine klimapolitische Intervention, mit der Maßnahmen effektiv umgesetzt werden könnten, um das 2-Grad-Ziel zu erreichen.

### Die Zukunft mitdenken

Ob die Staatengemeinschaft noch in der Lage sein wird, die zum Erreichen der versprochenen Klimaziele erforderlichen Klimaschutzmaßnahmen schnell genug umzusetzen, ist fragwürdig. Zum einen fußen die Weltwirtschaft und unser bisheriger

**Die Welt ist in einem solchen Ausmaß von fossilen Brennstoffen abhängig, dass ein kleiner Wirtschaftsaufschwung wie im Jahr 2017 genügt, alle Emissionsersparungen durch Sonne, Wasser- oder Windkraft innerhalb kurzer Zeit zunichtezumachen.**





Lebensstil auf Energie aus fossilen Brennstoffen. Dieses Fundament in nur wenigen Jahren aufzusprengen, ohne schmerzhaft Einschnitte in Kauf zu nehmen oder die wirtschaftliche Entwicklung zu gefährden, erscheint zurzeit unrealistisch. Zielstrebigkeit in Sachen Klimaschutz setzt voraus, dass die angestrebten Treibhausgas-Einsparungen schon heute in jede zukunftsweisende Entscheidung mit einfließen – zum Beispiel bei Bauprojekten. Ob Gebäude, Containerschiffe oder Industrieanlagen – alles, was heute neu gebaut wird, müsste entweder den strengen Klimaschutz-Leitlinien der Zukunft entsprechen oder diesbezüglich schnell umrüstbar sein. Schließlich sollen diese neuen Häuser, Fabriken, Straßen, Schienennetze, Schiffe und anderen Infrastrukturen deutlich länger im Einsatz sein als bis zum politisch ausgehandelten Stichjahr 2030.

Diese Weitsicht aber lassen viele Entscheidungsträger bislang vermissen – oder anders gesagt: Es klafft eine riesige Lücke zwischen dem, was die Verantwortlichen wissen, und dem, was sie politisch umsetzen. In der Bundesrepublik Deutschland beispielsweise sind auch im Jahr 2017 die Kohlendioxid-Emissionen im Industrie- und Verkehrssektor weiter angestiegen. Einen leichten Rückgang gab es lediglich in der Energiewirtschaft. Fakt ist, dass Deutschland noch immer weit seinem Ziel hinterherhinkt, den Treibhausgas-Ausstoß bis zum Jahr 2020 um 40 Prozent zu reduzieren. Im Vergleich zum Ausgangsjahr 1990 sind die Gesamtemissionen in Deutschland bislang nur

um 27,7 Prozent gesunken. Bis zum Stichjahr 2030 sollen es 55 Prozent sein, doch fehlen bisher sowohl der politische Wille zur umfassenden Energie- und Verkehrswende als auch die passenden Konzepte. ♦

### KOMPAKT

- Der Anteil von Strom aus erneuerbaren Energien wächst weltweit. Dennoch reichen diese Emissionseinsparungen nicht aus, um die Gesamtmenge an freigesetzten Treibhausgasen zu reduzieren.
- Der weltweite Bedarf an Energie und Nahrungsgütern wird weiter zunehmen und somit zusätzliche Emissionen verursachen.
- Klimaforscher haben einen Katalog drastischer Klimaschutzmaßnahmen erarbeitet, mit denen die Erderwärmung gestoppt werden könnte. Bis diese Maßnahmen jedoch weltweit umgesetzt werden können, müssen sehr große Hürden überwunden werden.
- Um den Klimaschutz wirksam voranzutreiben, sollten Kohlendioxid-Emissionen besteuert werden. Diese Maßnahme würde auch Anreize setzen, neue Methoden zur Emissionsvermeidung zu entwickeln.

Der Klimawandel verändert die Erde bereits nachhaltig und zwingt Mensch und Natur, sich anzupassen. Klar ist: Wer die Erderwärmung begrenzen will, muss aufhören, CO<sub>2</sub> in die Atmosphäre einzuleiten. Unklar ist, ob dies gelingt und ausreicht oder ob die Menschheit nicht vielleicht gezwungen ist, gezielt Methoden anzuwenden, um Kohlendioxid aus der Atmosphäre zu entfernen und verbleibende CO<sub>2</sub>-Emissionen komplett zu kompensieren (Netto-Null-Emissionen). Problemlos ist auch das nicht.



## HANDLUNGSSPIELRÄUME: NEUE LÖSUNGEN GESUCHT

Die Situation stellt sich wie folgt dar: Ohne umfassende Maßnahmen zur Emissionsvermeidung wird sich das Klima der Welt bis zum Ende des 21. Jahrhunderts stark verändern. Wie genau das menschliche Leben auf der Erde dann aussehen wird, kann bislang niemand mit Sicherheit sagen. Gewiss aber ist, dass sich die Lebensbedingungen in vielen Regionen der Erde verschlechtern würden.

Um Risiken zu minimieren, muss der Temperaturanstieg auf unter 2 Grad Celsius begrenzt werden. Voraussetzung dafür ist, dass es rechtzeitig gelingt, alle CO<sub>2</sub>-Emissionen zu stoppen oder aber zu neutralisieren. Zurzeit besteht aber noch eine riesige Kluft zwischen diesem Wissen und dem notwendigen Handeln.

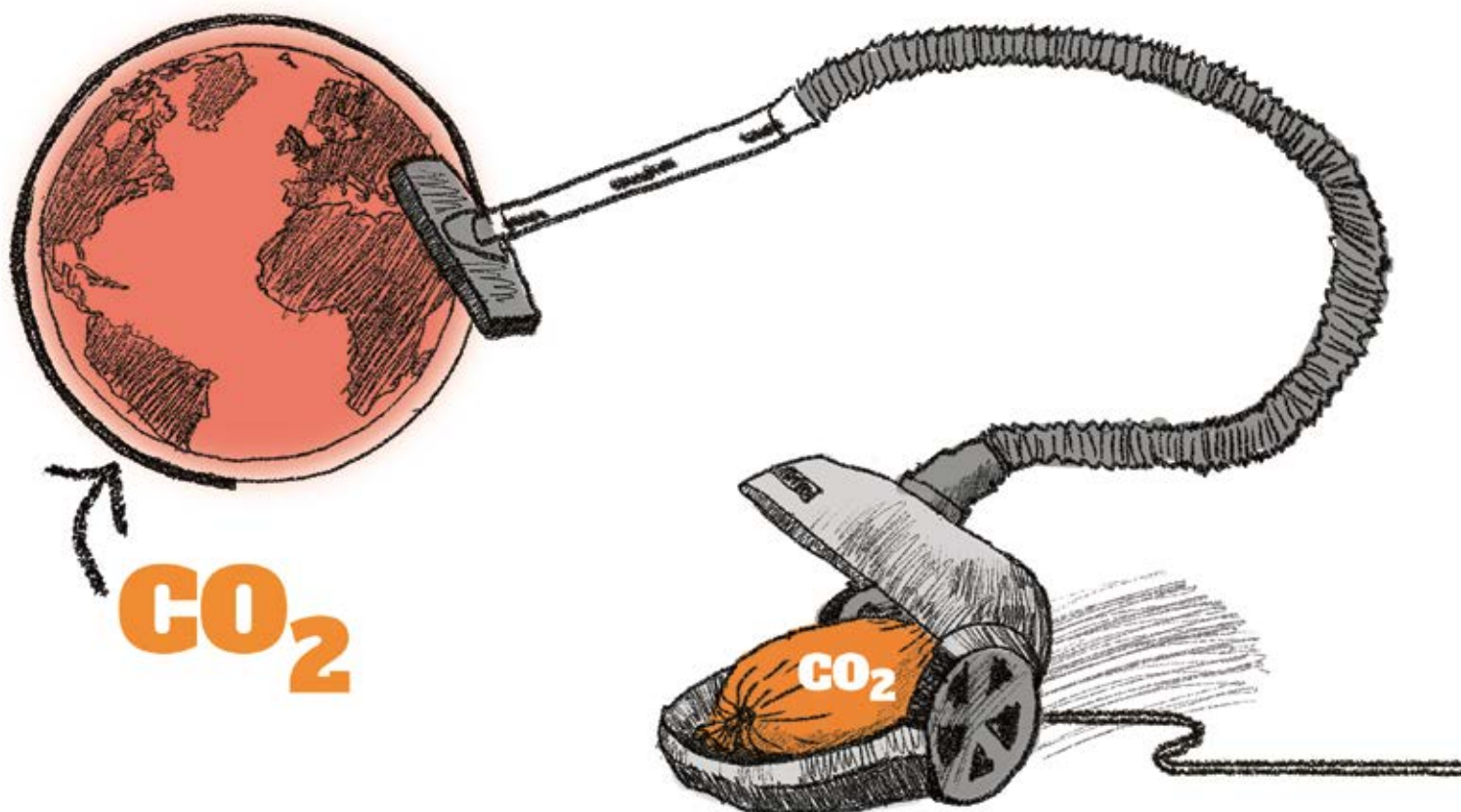
### Könnten wir uns nicht einfach anpassen?

Warum konzentriert sich die Menschheit nicht darauf, sich an das wärmer werdende Klima anzupassen? Erfolgreiche Ideen und Projekte gibt es weltweit. In Kenia beispielsweise berät der Wetterdienst interessierte Kleinbauern bei der Planung ihrer Aussaat. Auf diese Weise wird sichergestellt, dass wertvolles Saatgut erst dann in den Boden gelangt, wenn tatsächlich

**Der Weltklimarat konstatiert:  
Der Klimawandel wird die Armut und  
Ungerechtigkeit auf der Welt verstärken  
und die Menschheit insgesamt  
verletzlicher machen.**

Regen in Aussicht ist. In einigen Bergdörfern des Himalaya-Gebirges fangen die Bewohner inzwischen sämtliches Brauch- und Regenwasser auf, um es für die Feldbewässerung zu nutzen. Gleichzeitig experimentieren die Bergbauern wie ihre Kollegen in der restlichen Welt mit neuen Getreidesorten, die für ihr Wachstum weniger Feuchtigkeit benötigen als alte Sorten und die zudem wärmeresistenter sind. An der deutschen Nordseeküste wurden in den zurückliegenden Jahren die Deiche erhöht, und in vielen Metropolen der Welt entwickeln Städteplaner und Architekten Konzepte, um die Großstädte besser zu durchlüften und den Wärmestau in den Straßen zu minimieren. Wetterexperten aus aller Welt kooperieren, um Extreme wie schwere Stürme, Starkregen oder lange Hitzeperioden besser vorhersagen zu können. Diese und viele andere Anpassungsmaßnahmen helfen, die Risiken des Klimawandels zu reduzieren. Sie sind unverzichtbar und werden auch künftig gebraucht. Aber: Die Möglichkeiten der Anpassung sind begrenzt.

Ab einer Lufttemperatur von mehr als 35 Grad Celsius fällt es den meisten Menschen schwer, einfachen alltäglichen Arbeiten nachzugehen. Die erschreckenden Schäden nach Hurrikanen wie Irma oder Dürrezeiten wie in der Sahelzone offenbaren, wie verletzlich die Wirtschafts- und Infrastrukturen sind. Und einen rapiden Meeresspiegelanstieg in Kauf zu nehmen, würde bedeuten, große Teile der dicht bevölkerten Küstenregionen insbesondere in armen Regionen aufzugeben. Verteilungskämpfe um Land, Wasser und Nahrungsmittel wären vorprogrammiert, wobei der Klimawandel vor allem jene Länder in Afrika und Asien besonders hart treffen würde, die schon heute zu den ärmsten Staaten zählen. Der Weltklimarat konstatiert: Der Klimawandel wird die Armut und Ungerechtigkeit auf der Welt verstärken und die Menschheit insgesamt verletzlicher machen.



### Emissionsvermeidung ist alternativlos, aber ist sie auch ausreichend?

Die Hoffnung, das 1,5-Grad- oder zumindest 2-Grad-Ziel tatsächlich erreichen zu können, speist sich unter anderem aus dem optimistischsten Szenario des 5. Weltklimaberichts von 2013 sowie aus dem im Herbst 2018 veröffentlichten Sonderbericht zum 1,5-Grad-Ziel. In diesen Berichten gehen die Klimaforscher nicht nur davon aus, dass weitreichende Maßnahmen zur Emissionsvermeidung politisch weltweit umgesetzt werden. Sie kalkulieren zusätzlich mit ein, dass die Menschheit zukünftig in der Lage sein wird, Kohlendioxid im großen Maßstab aus der Erdatmosphäre zu entfernen und sicher zu speichern. Je länger die Emissionsvermeidung aufgeschoben wird, desto mehr CO<sub>2</sub> muss immer schneller aus der Atmosphäre entfernt werden.

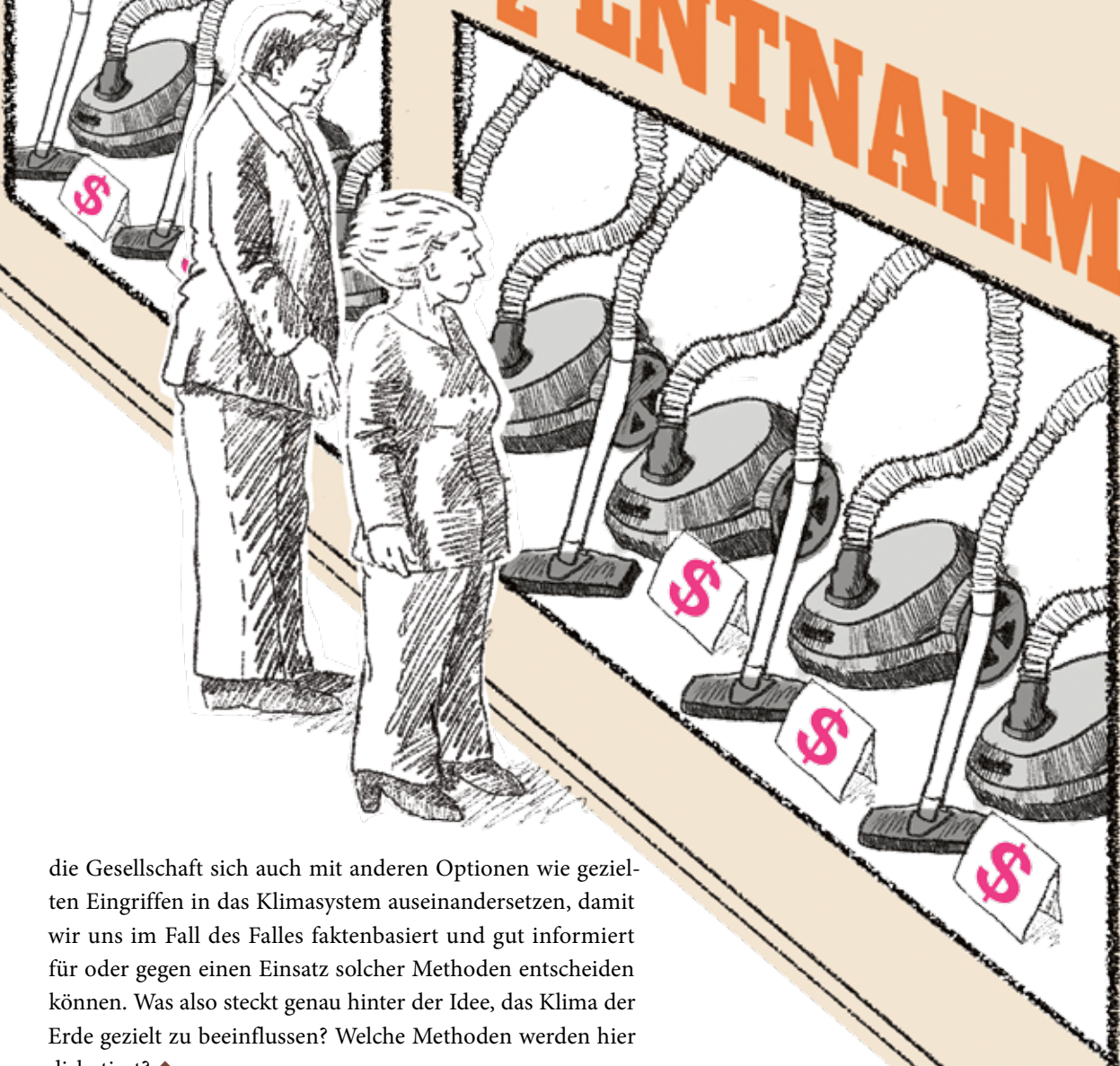
**Um das Pariser Klimaziel zu erreichen, müssen wir im Jahr 2050 technisch in der Lage sein, einige Milliarden Tonnen CO<sub>2</sub> pro Jahr aus der Atmosphäre zu entfernen.**

Eine solche gezielte Beeinflussung des Klimasystems über einen Eingriff in den Kohlenstoffhaushalt der Erde ist jedoch mit großen Unsicherheiten behaftet. Unklar ist beispielsweise, welches Potenzial die hierbei diskutierten Methoden wirklich haben und zu welchen Nebenwirkungen ihre großflächige Anwendung führen könnte. Unbeantwortet sind bislang auch verwaltungstechnische Fragen: Wer zum Beispiel würde haften, wenn es im Falle eines Einsatzes zu unvorhergesehenen Schäden käme?

Bislang gibt es keine Pläne, wie eine solche CO<sub>2</sub>-Entnahme als Ergänzung zu starken Emissionsminderungen umgesetzt werden sollte. Darüber hinaus werden in der Wissenschaft auch Eingriffe in das Klimasystem diskutiert, die direkt in den Strahlungshaushalt der Erde eingreifen, um die Temperaturziele auch trotz zu hoher atmosphärischer CO<sub>2</sub>-Konzentrationen möglicherweise erreichen zu können. Solange es nicht gesichert ist, dass die vereinbarten Klimaziele einzig mit einer Reduktion unserer Emissionen erreicht werden können, muss

# CO<sub>2</sub>-ENTNAHME

Es gibt eine Fülle an CDR-Methoden, deren Potenziale, Risiken und Kosten sehr unterschiedlich sind.




die Gesellschaft sich auch mit anderen Optionen wie gezielten Eingriffen in das Klimasystem auseinandersetzen, damit wir uns im Fall des Falles faktenbasiert und gut informiert für oder gegen einen Einsatz solcher Methoden entscheiden können. Was also steckt genau hinter der Idee, das Klima der Erde gezielt zu beeinflussen? Welche Methoden werden hier diskutiert? ♦

## KOMPAKT

- Der Versuch, sich an den Klimawandel anzupassen, ohne seine Ursachen zu bekämpfen, ist keine Alternative. Die Möglichkeiten der Anpassung sind begrenzt und die Wirtschafts- und Infrastrukturen in den meisten Ländern extrem verletzlich.
- Das 1,5-Grad-Ziel (und vermutlich auch das 2-Grad-Ziel) kann laut Projektionen des Weltklimarats nur erreicht werden, wenn es neben einer drastischen Emissionsvermeidung gelingt, Kohlendioxid im großen Maßstab aus der Atmosphäre zu entfernen.

## WEITERLESEN

- Methoden des Climate Engineerings: Lässt sich die Erderwärmung bremsen, wenn man das Klimasystem gezielt beeinflusst? – S. 22
- Ethisch und juristisch betrachtet: Haben wir das Recht oder sogar die Pflicht, das Klima gezielt zu beeinflussen? – S. 42
- Kontrolle nur begrenzt möglich: Die Krux des chaotischen Klimasystems – S. 54



Um ein weiteres Aufheizen der Erde zu verhindern, werden verschiedene Methoden angedacht, die im Wesentlichen zwei unterschiedliche Strategien verfolgen: der Atmosphäre Kohlendioxid zu entnehmen oder die Einstrahlung von Sonnenenergie zu verringern. Keine der hierbei diskutierten Methoden ist bislang ausgereift. Weder Potenziale noch mögliche Risiken lassen sich bislang genau abschätzen. Für einige Methoden ist aber schon jetzt abzusehen, dass diese auch erhebliche Nebenwirkungen haben könnten.

## METHODEN DES CLIMATE ENGINEERINGS:

# LÄSST SICH DIE ERDERWÄRMUNG BREMSEN, WENN MAN DAS KLIMASYSTEM GEZIELT BEEINFLUSST?

Mit dem Begriff Climate Engineering (CE) werden seit einiger Zeit großskalige technische Maßnahmen bezeichnet, die das Klima beeinflussen sollen, um den vom Menschen verursachten Klimawandel zu bremsen. Dabei werden unter diesem Begriff zwei grundlegend unterschiedliche Strategien zusammengefasst:

1. Der erste Typus wird als Carbon Dioxide Removal (CDR, Kohlendioxid-Entnahme) bezeichnet und greift mit der Beeinflussung des Kohlenstoffkreislaufs in den Naturhaushalt der Erde ein. Die hierbei diskutierten Methoden sollen Kohlendioxid aus der Atmosphäre entfernen und langfristig speichern. Auf diese Weise soll der Atmosphäre die Ursache der Klimaerwärmung entzogen werden: die erhöhte Kohlendioxid-Konzentration, verursacht durch die Emissionen aus fossilen Energieträgern.
2. Zum anderen werden Methoden diskutiert, die in den Strahlungshaushalt der Erde eingreifen. Sie sollen dafür sorgen, dass weniger Strahlung die Erde erreicht oder Strahlung stärker ins Weltall abgegeben wird. Dieser Verfahrenstypus wird als Radiation Management (RM, Strahlungsmanagement) bezeichnet. Er soll die Erderwärmung reduzieren, obwohl die Treibhausgase, insbesondere das sehr langlebige Kohlendioxid, in der Atmosphäre verbleiben.

### Stand der Dinge

Schon seit mehr als 20 Jahren beschäftigen sich Wissenschaftler weltweit mit verschiedenen Methoden der Kohlendioxid-Entnahme (CDR) und des Strahlungsmanagements (RM). Einige wurden bereits im Labor oder in kleinen Experimenten im Freiland getestet, viele sind bislang nur theoretische Ansätze. Aussagen über ihre Wirksamkeit beruhen derzeit vor allem auf Modellierungsergebnissen. Es ist unklar, inwieweit deren

Anwendung selbst bei einer drastischen Emissionsreduktion praktisch möglich und ausreichend wäre, um die Erderwärmung auf 1,5 bzw. unter 2 Grad Celsius zu beschränken.

Zum jetzigen Zeitpunkt gibt es keine CDR- oder RM-Methode, die im großen Maßstab einsetzbar wäre. Je nach Methode sind Potenzial und/oder Nebenwirkungen nicht ausreichend bekannt. Zudem sind die technischen Konzepte noch nicht ausgereift bzw. fehlen Strategien zur großflächigen Anwendung der Methoden. In vielen Fällen gibt es wissenschaftliche, rechtliche, ethische oder politische Bedenken gegen Feldexperimente und gegen den Einsatz der Methoden.

### Von welchem Zeithorizont und räumlichen Maßstab sprechen wir?

Damit CDR- und RM-Methoden signifikante Auswirkungen auf die planetare Strahlungsbilanz bzw. den Kohlendioxid-Gehalt der Atmosphäre haben können, müssen sie in einem sehr großen Maßstab und teilweise für sehr lange Zeit durchgeführt werden. Hier gibt es aber einen wesentlichen Unterschied zwischen den CDR- und den RM-Methoden:

→ RM-Methoden sind prinzipiell nicht permanent, sondern wirken nur so lange, wie der gezielte Eingriff in den Strahlungshaushalt aufrechterhalten wird. Da man in diesem Falle nicht die Ursache der Klimaerwärmung, das Kohlendioxid, bekämpft, würde man die RM-Methoden so lange weiterführen müssen, bis das langlebige Kohlendioxid auf natürlichem Wege oder durch flankierende CDR-Maßnahmen wieder aus der Atmosphäre entfernt ist. Die natürliche Senke ist im Wesentlichen der Ozean. Er nimmt aktuell etwa 20 bis 25 Prozent des heute emittierten Kohlendioxids auf. Seine Kohlendioxid-Aufnahme verläuft aber sehr langsam und dauert viele Jahrhunderte bis Jahrtausende. Entsprechend müssten die RM-Methoden über viele Generationen hinweg am Laufen gehalten und finanziert werden und zeitgleich der Wandel zu einer kohlenstoffneutralen Gesellschaft gelingen, gegebenenfalls mit Unterstützung durch CDR. Voraussetzung wäre eine stabile Weltordnung über viele Jahrzehnte bis Jahrhunderte, damit die internationale Staatengemeinschaft an einem Strang ziehen und beim Strahlungsmanagement kooperieren kann.

## DIE VERWIRRENDE VIELFALT DER BEGRIFFE

In der Diskussion um die gezielte Beeinflussung des Klimasystems sind in den vergangenen Jahren immer wieder neue Begriffe aufgetaucht. Das erschwert den Zugang zum Thema. Seit gut einem Jahrzehnt wird der Begriff Climate Engineering benutzt, um Methoden zu kennzeichnen, die gezielt und in großem Maßstab in das Klimasystem eingreifen, um die Folgen des vom Menschen verursachten Klimawandels abzuschwächen. Synonym zu Climate Engineering spricht man im angloamerikanischen Sprachraum auch von Geoengineering, vereinzelt von Climate Intervention oder Climate Remediation. All diese Begriffe umfassen traditionell sowohl die Verfahren der Kohlendioxid-Entnahme (Carbon Dioxide Removal, CDR) als auch des Strahlungsmanagements (Radiation Management, RM).

Beim RM selbst gibt es eine ähnliche Begriffsvielfalt. Häufig wird der Begriff Solar Radiation Management (SRM) benutzt oder auch Albedo Modification. Da dieses jedoch nicht den Vorschlag abdeckt, über die Reduktion von Zirrus-Wolken den langwelligen Teil des Strahlungshaushaltes zu beeinflussen, greifen wir auf den Terminus RM zurück.

Diskutierte Methoden sind bei RM beispielsweise die Veränderung des Strahlungshaushaltes durch Aerosoleintrag in die Stratosphäre, bei CDR zum Beispiel die Verstärkung der CO<sub>2</sub>-Aufnahmekapazität des Ozeans oder das Aufforsten von ganzen Landstrichen. In „großem Maßstab“ heißt dabei, dass die Methoden signifikante Auswirkungen auf die planetare Strahlungsbilanz bzw. den Kohlendioxid-Gehalt der Atmosphäre haben. Das Anstreichen einiger Häuser oder Dächer mit weißer Farbe oder das Pflanzen weniger Bäume fallen also nicht unter Climate Engineering, weil die globalen Auswirkungen verschwindend gering sind. Werden aber in großem Stil Landflächen aufgeforstet, um einen merklichen Effekt auf die atmosphärische Kohlendioxid-Konzentration zu bewirken und die Auswirkungen des Klimawandels abzuschwächen, entspricht dies einem gezielten großskaligen Eingriff in das Klimasystem. Denn die Umwandlung ganzer Landstriche in Plantagen verändert neben den Ökosystemen und der Biodiversität zum Beispiel auch den Wasserkreislauf und die Farbe der Erde – und damit das Klimasystem.

Die unmittelbaren Wirkungsweisen von RM und CDR sind grundsätzlich verschieden: RM greift in den Strahlungshaushalt

der Erde ein, um die Erwärmung abzuschwächen, ohne dabei CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre zu entnehmen. CDR greift hingegen in den Kohlenstoff-Kreislauf der Erde ein und hat die Entnahme von CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre zum Ziel, geht also die wesentliche Ursache der menschengemachten Erderwärmung an.

Im Zusammenhang mit dem 2015 in Paris verabschiedeten Klimaabkommen ist für CDR-Maßnahmen ein weiterer Begriff gebräuchlich geworden: die sogenannten Negative Emission Technologies (NETs, negative Emissionstechnologien), wobei negative Emissionen für die Entnahme von Kohlendioxid aus der Erdatmosphäre steht. Gelegentlich wird statt CDR oder NETs auch der Begriff Greenhouse Gas Removal (GGR) verwendet, um neben dem Kohlendioxid auch andere Treibhausgase mit betrachten zu können. RM-Methoden gehören grundsätzlich nicht zu den negativen Emissionstechnologien, selbst wenn sie als Nebeneffekt auch die Treibhausgas-Konzentrationen beeinflussen können.

In der aktuellen Diskussion gibt es vermehrt Stimmen, CDR bzw. NETs generell nicht mehr zum Climate Engineering zu zählen. Denn CDR trage zur Verringerung der Kohlendioxid-Konzentration bei und wirke damit genauso ursächlich wie etwa die in kleinem Maßstab bereits als Mitigationsmaßnahme etablierte Aufforstung. Entscheidend ist hierbei die Definition von Mitigation: Der Weltklimarat definiert sie als „a human intervention to reduce emissions or enhance the sinks of greenhouse gases“ (Eingriff durch den Menschen, um den Ausstoß von Treibhausgasen zu verringern oder die Senken für Kohlenstoff zu vergrößern). Die Entnahme von Kohlendioxid aus der Atmosphäre über eine Erhöhung der terrestrischen oder marinen CO<sub>2</sub>-Aufnahme entspricht der Schaffung von größeren Senken. Entsprechend der Mitigationsdefinition des Weltklimarats werden solche CDR-Methoden daher auch oftmals als Teil von Mitigation angesehen. Da Climate Engineering stark umstritten ist und in Wissenschaft und Gesellschaft kritisch betrachtet wird, könnte ein Ablösen der meisten CDR-Methoden von dem Oberbegriff Climate Engineering und eine Einordnung unter das Konzept der Mitigation ihre gesellschaftliche Akzeptanz und politische Umsetzung erleichtern.

In dieser Broschüre wird der Terminus Climate Engineering, der CDR und RM zusammenfasst, als Oberbegriff gleichwohl dort beibehalten, wo Attribute (beispielsweise großer Maßstab, gezielter Eingriff) und Prinzipien angesprochen werden, die für



→ Gelänge es, CDR in großer Dimension aufzubauen, könnte es im Zusammenspiel mit massiver Emissionsreduktion möglich sein, die Kohlendioxid-Konzentration in der Atmosphäre auf dem heutigen Niveau zu halten oder sogar noch weiter zu reduzieren. Dabei ist allerdings zu beachten, dass man beim CDR zwischen sogenannten permanenten und zeitlich begrenzten, also temporären Speichern unterscheidet. Zu letzteren zählen unter anderem Bäume. Während ihres Wachstums entziehen Bäume der Atmosphäre Kohlendioxid und speichern es im Holz. Buchen beispielsweise werden mehr als 400 Jahre alt und können das Klimagas entsprechend lange der Atmosphäre entziehen. Verwendet man das Holz anschließend zum Bauen, bliebe das Kohlendioxid in den Gebäuden weiter für lange Zeit konserviert. Pflanzenkohle könnte das Kohlendioxid möglicherweise einige tausend Jahre speichern. Ein entscheidender Speicher ist ferner der Ozean. Das beispielsweise im Ozean über absinkende Algen in die Tiefe eingebrachte Kohlendioxid gelangt nach etwa 1.000 Jahren wieder an die Meeresoberfläche und von dort in die Atmosphäre. Neutralisiert man das im Meerwasser gelöste Kohlendioxid mit basischen Substanzen, wie bei der CDR-Methode der beschleunigten Verwitterung von Gestein, wird das Treibhausgas dauerhaft aus dem System entfernt. Zu den permanenten Speicherformen gehört auch die dauerhafte Bindung von Kohlendioxid in Gestein. Hier wird das Treibhausgas mit Wasser vermischt und mit hohem

Zum jetzigen Zeitpunkt gibt es keine CDR- oder RM-Methode, die in ausreichend großem Maßstab eingesetzt werden könnte, um die Erderwärmung zu stoppen.

Druck in vulkanisches Basaltgestein tief in die Erde gepumpt. In einem natürlichen Prozess reagiert das Basaltgestein dann chemisch mit dem Kohlendioxid und formt dabei Karbonatminerale, vergleichbar mit Kalkstein, in denen das Gas dauerhaft gebunden wird.

Sollte sich die Gesellschaft entscheiden, Emissionsminderungen durch Climate Engineering zu ergänzen, so wären Methoden zur Kohlendioxid-Entnahme hinsichtlich der Klimaziele langfristig sinnvoller als Methoden des Strahlungsmanagements. Denn erstere bekämpfen die Ursache direkt, indem sie das vom Menschen emittierte Kohlendioxid aus der Atmosphäre entnehmen. Zudem wirkt die Kohlendioxid-Entnahme gegen die Versauerung der Ozeane. Allerdings sind CDR-Methoden kein geeignetes Mittel, um schnell in die Klimaabläufe der Erde einzugreifen. Sie bräuchten aufgrund der erforderlichen Kohlenstoffmassen, die umgesetzt werden müssten, schätzungsweise fünf bis 15 Jahre, um eine klimatische Wirkung zu entfalten. Auch CDR-Maßnahmen müssen

beide Kategorien gelten. Damit schließt die Broschüre an die gebräuchliche Terminologie an. Für die eigentliche Beurteilung der Chancen und Risiken einzelner CE-Optionen ist der bedeutungsarme Oberbegriff häufig irrelevant und nicht zielführend. Daher wird dort immer zwischen Strahlungsmanagement und Kohlendioxid-Entnahme unterschieden. Da der Begriff Mitigation sehr unterschiedlich gedeutet wird, verzichten wir ganz auf dessen Verwendung und sprechen von Emissionsvermeidung, wenn die Verhinderung von Treibhausgasemissionen gemeint ist, und von Kohlendioxid-Entnahme, wenn von der Schaffung von Senken gesprochen wird.

Erwähnt sei im CDR-Kontext noch der Begriff Natural Climate Solutions (natürliche oder naturnahe Klimälösungen). Dieses Set von Maßnahmen umfasst neben dem Erhalt kohlenstoffreicher tropischer Wälder, Mangroven oder Moore auch das

Entfernen atmosphärischen Kohlendioxids durch Wiederaufforstung, Landmanagement und andere ökosystem-basierte Ansätze wie Renaturierung von Küstengebieten (Blue Carbon) und Mooren. Natural Climate Solutions können Klima- und Naturschutz unmittelbar verbinden und werden daher häufig auch von Umweltschutzorganisationen vorangetrieben. Während einzelne lokale Maßnahmen nur ein geringes Potenzial im Hinblick auf die Kohlendioxid-Aufnahme aus der globalen Atmosphäre haben, könnten bei globaler Anwendung bedeutende Mengen Kohlendioxid entfernt werden. Unklar ist jedoch, inwieweit Anwendungen in großem Maßstab mit Naturschutz und anderen Nachhaltigkeitszielen vereinbar sind, wie nachhaltig die CO<sub>2</sub>-Speicherung bei diesen Verfahren ist und wie intensiv die Flächen für eine möglichst permanente CO<sub>2</sub>-Entnahme gemanaged werden müssen. ♦

also rechtzeitig und über eine längere Zeit angewendet werden, um eine Wirkung zu erzielen. Für viele Verfahren muss darüber hinaus die Dauerhaftigkeit der CO<sub>2</sub>-Speicherung überwacht werden.

Entscheidend ist ferner die räumliche Ausdehnung der Methoden. Denn nur in einem großen Maßstab angewandt wären deren Auswirkungen auf die planetare Strahlungsbilanz bzw. den Kohlendioxid-Gehalt der Atmosphäre relevant für das Problem der Erderwärmung. Als eine CDR-Methode wird beispielsweise die Aufforstung von Landflächen diskutiert. Allerdings müsste sehr viel Wald aufgeforstet werden, um relevante Mengen Kohlendioxid zu binden. Die potenzielle Landfläche, die sich weltweit zur Aufforstung eignet, ist jedoch begrenzt. Ähnliches gilt für den großräumigen Anbau von Biomasseplantagen. Außerdem ist diese Landfläche dann für andere Nutzungen, insbesondere die Nahrungsmittelproduktion, verloren. Damit berühren biomasse-basierte CDR-Verfahren unmittelbar Fragen der Ernährungssicherheit.

Eine Maßnahme, die sich hingegen prinzipiell unbegrenzt einsetzen ließe, ist das sogenannte Direct-Air-Capture-Verfahren. Dabei wird der Luft mithilfe technischer Anlagen Kohlendioxid entzogen. Das aus der Luft herausgelöste Kohlendioxid könnte dann in der chemischen Industrie weiterverwendet werden (Carbon Capture and Usage, CCU). Damit es der Atmosphäre für lange Zeit entzogen wird, müsste es allerdings energieaufwändig zu langlebigen Produkten verarbeitet werden. Das mengenmäßige Potenzial von CCU wird im Vergleich zu der für das Erreichen der Klimaziele erforderlichen CO<sub>2</sub>-Entnahme als nicht sehr hoch eingeschätzt. Eine Alternative wäre die Speicherung des herausgelösten Kohlendioxids in tiefen Gesteinsschichten, beispielsweise in leeren, bereits ausgebeuteten Erdgas- oder Erdöllagerstätten. Experten bezeichnen dieses Verfahren als Carbon Capture and Storage (CCS; Kohlenstoffbindung und -speicherung, siehe Kasten S. 29).

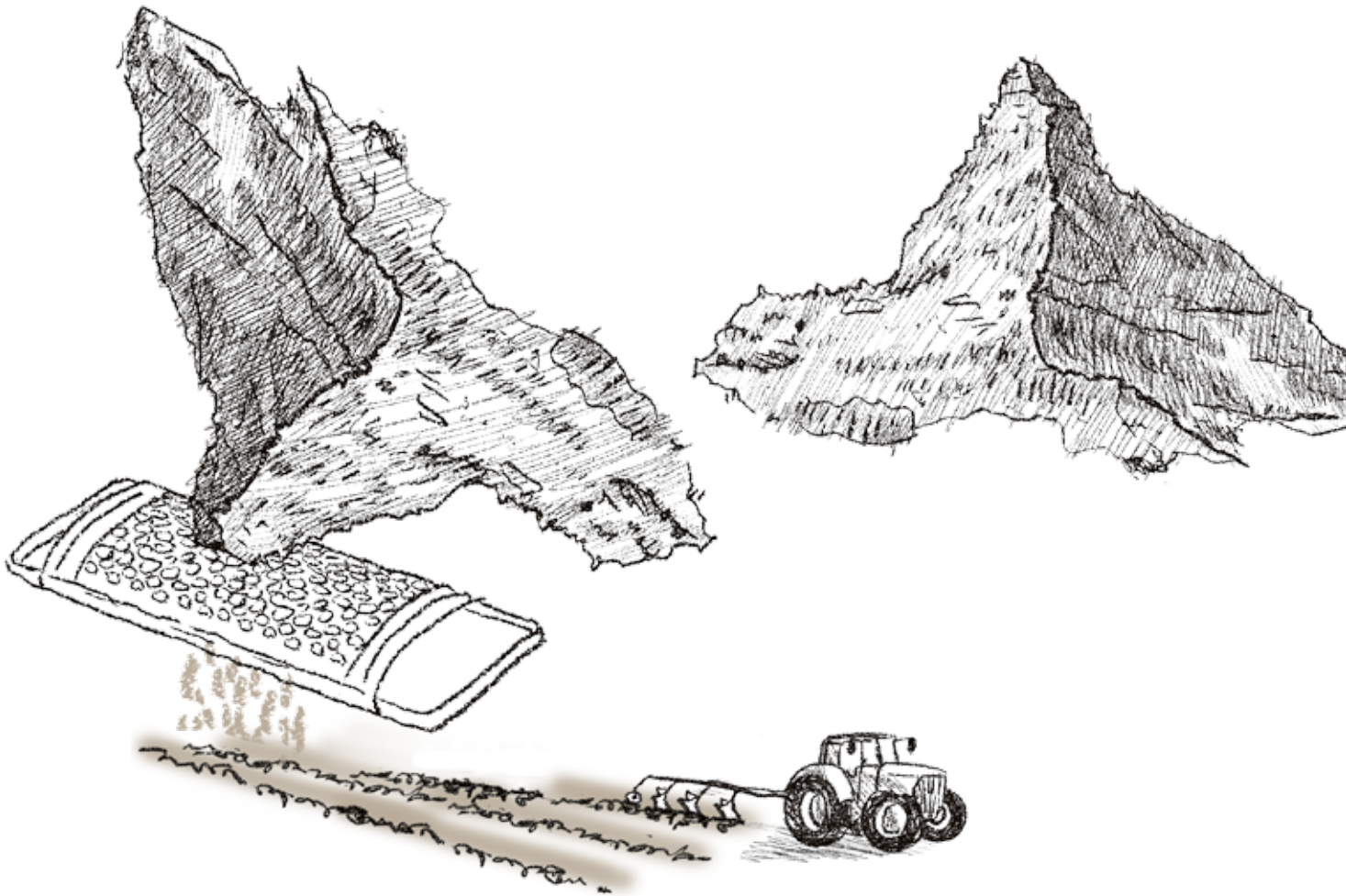
Geologen gehen davon aus, dass weltweit unterirdische Lagerstätten mit ausreichendem Volumen zur Verfügung stehen, um langfristig alle anthropogenen Kohlendioxid-Emissionen aufzunehmen und so der Atmosphäre zu entziehen.

## Die verschiedenen Methoden

Sowohl der mögliche Nutzen als auch das Risikopotenzial der verschiedenen CDR- und RM-Methoden unterscheiden sich deutlich. Bei den CDR-Methoden ist darüber hinaus die jeweilige Zuordnung zu Noch-Klimaschutz oder Schon-Climate-Engineering strittig bzw. schwierig. Es ist daher wichtig, sich jede Methode einzeln anzusehen.

Auf den folgenden Seiten werden zunächst die Methoden der Kohlenstoff-Entnahme (CDR) unterteilt nach Maßnahmen an Land und im Ozean sowie im Anschluss die Methoden des Strahlungsmanagements (RM) im Detail vorgestellt. Für alle Methoden werden Potenzial und Nebenwirkungen abgeschätzt, wobei das angegebene Potenzial nicht unbedingt ausgeschöpft werden müsste, um die Klimaziele von Paris zu erreichen. Im Sachstandsbericht des Weltklimarats sind es circa 10–20 Milliarden Tonnen CO<sub>2</sub>, die gegen Ende des Jahrhunderts pro Jahr aus der Atmosphäre entnommen werden müssten, wenn umgehend mit einer drastischen Verminderung der Emissionen begonnen wird.

**Die unmittelbaren Wirkungsweisen von RM und CDR sind grundsätzlich verschieden: RM greift in den Strahlungshaushalt der Erde ein, um die Erwärmung abzuschwächen, ohne dabei CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre zu entnehmen. CDR greift hingegen in den Kohlenstoffkreislauf der Erde ein und hat die Entnahme von CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre zum Ziel – geht also die wesentliche Ursache der menschengemachten Erderwärmung an.**



## CDR-METHODEN → ANWENDUNGEN AN LAND

### BESCHLEUNIGTE VERWITTERUNG

Kohlendioxid kann durch die Verwitterung von gezielt ausgebrachten Karbonat- und Silikatgesteinen gebunden werden. Diese könnten als Gesteinspulver vor allem auf tief verwitterten und verarmten, sauren Ackerböden in den feuchten Tropengebieten ausgebracht werden. Als positiver Nebeneffekt würden sich die Bodeneigenschaften verbessern. Der Einsatz der beschleunigten Verwitterung wird daher als eine Methode der Kohlendioxid-Entnahme betrachtet, bei der die Vorteile in der Summe überwiegen könnten. Da verarmte Böden wie beispielsweise der Ferralsol in den niederschlagsreichen Tropengebieten vorkommen, ergäbe sich hier auch kein Problem mit der Bewässerung. Ein Nachteil der Methode könnte die Freisetzung von Schwermetallen sein, falls ungeeignete Gesteine verwendet würden.

#### Potenzial

Berechnungen zum Potenzial dieser Methode wurden unter anderem für das vulkanische Silikatgestein Basalt durchgeführt. Abschätzungen zeigen, dass drei Milliarden Tonnen ausgebrachtes Basaltpulver pro Jahr weltweit rund eine Milliarde Tonnen Kohlendioxid binden könnte. Insgesamt wird

das Potenzial zur Bindung von Kohlendioxid auf zwei bis vier Milliarden Tonnen jährlich geschätzt – je nach genutzter Fläche und Gesteinsart. Noch nicht abgeschätzt wurde das zusätzliche Potenzial zur Bindung von Kohlendioxid, das sich durch das verbesserte Wachstum der Pflanzen aufgrund der in den Gesteinen enthaltenen Nährstoffe ergäbe.

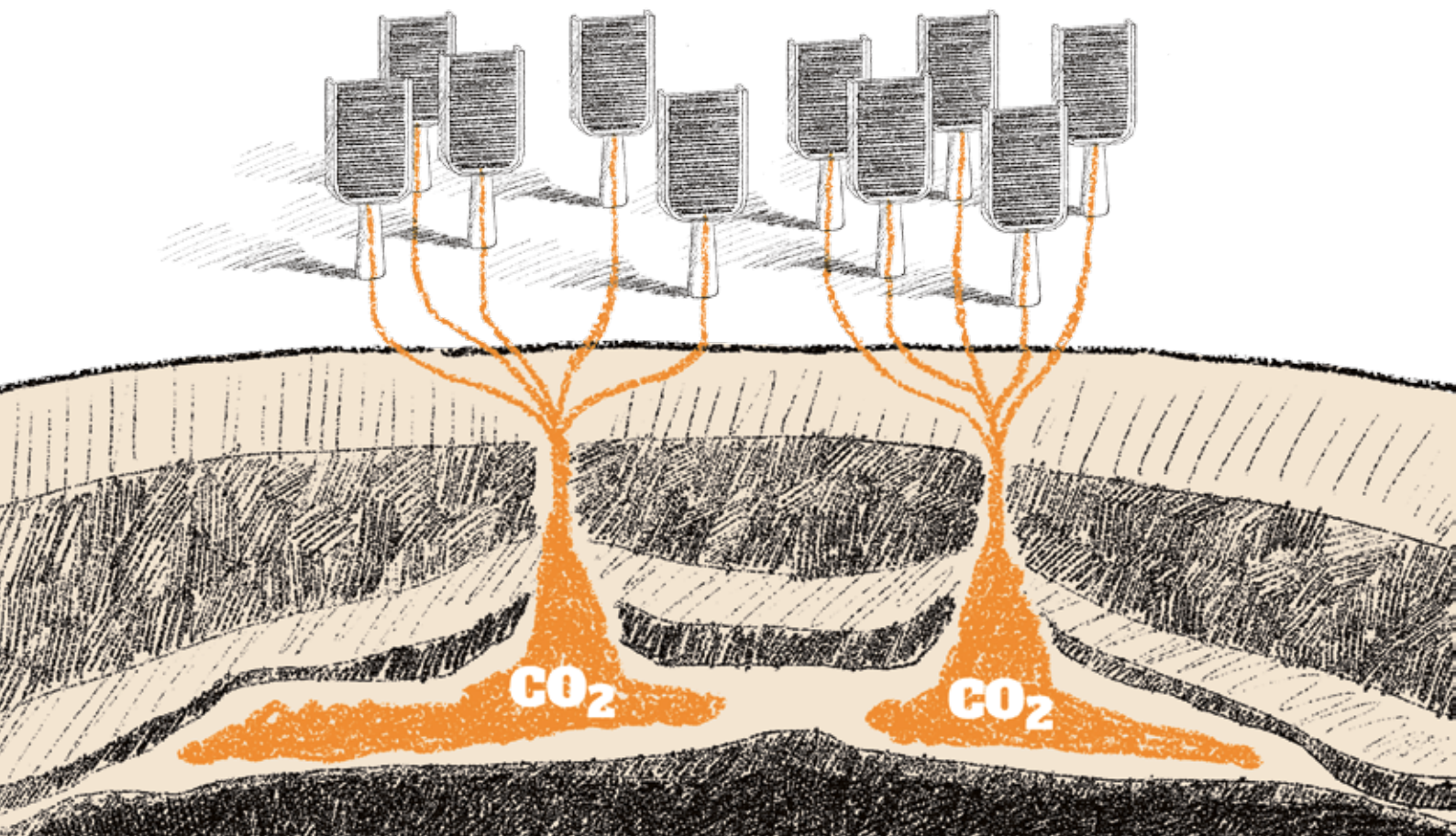
#### Maßstab

Um das weltweite Potenzial voll ausschöpfen zu können, müssten alle landwirtschaftlichen Flächen sowie zusätzliche Waldflächen genutzt werden. Jährlich müssten bis zu zwölf Milliarden Tonnen Gestein gewonnen, gemahlen und ausgebracht werden. Dieser Wert ist vergleichbar mit der Menge jährlich abgebauter Kohle.

#### Anwendungsreife und Forschungsbedarf

Die Düngung von Äckern mit Gesteinspulver ist ein schon lange praktiziertes Verfahren und wird in manchen Regionen bereits in großem Maßstab angewendet. Beispielsweise wird auf den Zuckerrohrplantagen in Brasilien und auf der Insel La Réunion seit den 1960er-Jahren Basaltpulver eingesetzt. Ältere wissenschaftliche Publikationen dazu werden im Hinblick auf das CDR-Potenzial zurzeit ausgewertet.

Mit kleinen Feldexperimenten wird die beschleunigte Verwitterung unter anderem in den USA, Malaysia und Brasilien



untersucht, auch mit dem Ziel, ausgelaugte Böden zu verbessern. Grundsätzlich würde eine Verbesserung verarmter Böden diese auch für die Nahrungsmittelproduktion und andere CDR-Methoden verfügbar machen. Globale Abschätzungen zu den Auswirkungen der Methode sind derzeit noch sehr ungenau, da wichtige Parameter – wie zum Beispiel die Verwitterungsgeschwindigkeit oder auch mögliche Nebenwirkungen aufgrund von Verunreinigungen zum Beispiel durch Schwermetalle im Gestein – ohne sorgfältige Experimente nicht geklärt werden können.

Der Vorteil der beschleunigten Verwitterung an Land ist, dass auf die bestehende Infrastruktur der Landwirtschaft aufgebaut werden könnte. Für eine Anwendung als CDR-Methode müsste allerdings der derzeitige Abbau von Gesteinen um ein Vielfaches erhöht werden. Da die Anwendung von Karbonaten und Silikaten insbesondere in wirtschaftlich oft schwächeren Tropenregionen am effektivsten ist, wäre zu klären, wie die Kosten dieser Maßnahmen (zum Beispiel Abbau, Transport) gedeckt werden könnten.

## DIRECT AIR CAPTURE

Mit Direct-Air-Capture-Systemen kann Kohlendioxid aus der Umgebungsluft gefiltert werden, so wie es Pflanzen und Bäume machen. Dazu wird die Luft zunächst über spezielle Bindemittel geleitet, die das Kohlendioxid aus der Luft filtern, und

anschließend verflüssigt. Um das abgetrennte Kohlendioxid der Atmosphäre langfristig zu entziehen, muss es entweder weiterverwendet (Carbon Capture and Usage, CCU) oder unterirdisch gespeichert werden (Carbon Capture and Storage, CCS).

### Potenzial und Maßstab

Mit Direct Air Capture könnte bei intensiver Weiterentwicklung der Technik Kohlendioxid prinzipiell unbegrenzt aus der Atmosphäre entfernt werden. Da die Kohlendioxid-Konzentration in der Luft mit nur etwa 0,04 Prozent aber sehr gering ist, müssten enorme Luftmengen gefiltert werden. Dafür sind große Anlagen nötig, die viel Energie verbrauchen. Die angegebenen Kosten einer Tonne verflüssigten Kohlendioxids variieren sehr stark. Im Mittel werden sie auf 600 US-Dollar pro Tonne Kohlendioxid geschätzt. In einem aktuellen Projekt in der kanadischen Provinz British Columbia wurde unlängst eine große Pilotanlage in Betrieb genommen, die einen Preis von rund 100 US-Dollar pro Tonne erreichen soll. Entscheidend für derlei Anlagen ist, dass ihr Einsatz nur dann sinnvoll ist, wenn sie mit regenerativen Energien betrieben werden, da bei der Verwendung fossiler Energieträger mehr Kohlendioxid-Emissionen verursacht würden, als durch die Anlage eingefangen werden könnten. Unklar ist bislang, wo das absorbierte Kohlendioxid für lange Zeit sicher gelagert bzw. wie es weiterverwendet werden könnte. Air Capture kann also nur dann im großen Stil funktionieren, wenn die Energie für die Anlagen klimaneutral erzeugt wird und ausreichende

Speicherkapazitäten (CCS) für das abgetrennte Kohlendioxid aufgebaut und Konzepte für eine anschließende Nutzung (CCU) entwickelt werden.

### Anwendungsreife und Forschungsbedarf

Grundsätzlich kämpfen die verschiedenen Direct-Air-Capture-Verfahren also vor allem mit dem Problem der Energieeffizienz. Sie hängen davon ab, ob oder in welchem Maße CCS etabliert bzw. CCU-Anwendungen entwickelt werden. Aktuell werden neben mehreren kleinen drei größere Direct-Air-Capture-Pilotanlagen betrieben. Das dabei herausgefilterte CO<sub>2</sub> wird entweder in die Nutzung (z. B. Gewächshäuser) gegeben oder verpresst und damit auch permanent aus der Atmosphäre entfernt.

### BIOENERGIE UND CCS (BECCS)

Ein anderes Verfahren, das im Kontext von CCS diskutiert wird, ist die Kultivierung schnell wachsender Pflanzen, die der Atmosphäre Kohlendioxid entziehen. Durch deren Verbrennung kann dann Energie gewonnen und das im Verbrennungsprozess freigesetzte CO<sub>2</sub> permanent gespeichert werden. Diese Methode wird als Bioenergie-CCS (BECCS) bezeichnet. Pflanzen, die hierfür infrage kommen, sind unter anderem das Chinaschilf (*Miscanthus*), Pappeln, Weiden sowie Eukalyptus-Arten. Sie alle liefern in sehr kurzer Zeit viel Biomasse. Durch die Kombination der Biomasse-Kraftwerke mit CCS ließe sich das bei der Verbrennung wieder frei werdende Kohlendioxid der Umwelt entziehen. Anders als Direct Air Capture hat

## EXKURS

### CCS – KOHLENDIOXID IN DER TIEFE SPEICHERN

Mit dem Begriff Carbon Capture and Storage (CCS) wird im Allgemeinen der Prozess der Abscheidung von Kohlendioxid und seine Speicherung im Untergrund bezeichnet. CCS wurde entwickelt, um das an einzelnen großen Quellen wie zum Beispiel an Zement-, Kohle- oder Erdgaskraftwerken frei werdende Kohlendioxid abzufangen, bevor es in die Atmosphäre gelangt. Anschließend wird das CO<sub>2</sub> tief im Untergrund in Gesteinsformationen oder in ausgediente Erdgas- bzw. Erdölfelder gepresst. CCS wird per se nicht als Climate Engineering bezeichnet. Es wird jedoch von einer Reihe angedachter CDR-Methoden zur Speicherung des Kohlendioxids benötigt – zum Beispiel bei der Kombination von Bioenergie-Gewinnung und CCS (BECCS) und Direct Air Capture.

Um zu prüfen, inwieweit CCS funktioniert und welche Risiken damit verbunden sind, wurden bislang weltweit rund 20 CCS-Forschungsprojekte durchgeführt. Teilweise entstanden sehr große CCS-Pilotanlagen, von denen einige bereits seit mehr als zehn Jahren in Betrieb sind. Ein Beispiel ist das Sleipner-Projekt im norwegischen Teil der Nordsee, bei dem Kohlendioxid, welches bei der Erdgasförderung extrahiert werden muss, in die sogenannte Utsira-Sandsteinformation gepresst wird. Das Projekt untersucht auch, inwieweit diese Sandsteinformation für eine dauerhafte Einlagerung von CO<sub>2</sub> geeignet ist. Insgesamt

bietet der Porenraum solcher Sandsteinformationen weltweit ein großes Speichervolumen für Kohlendioxid. Das Kohlendioxid reagiert mit dem Gestein und wird dadurch chemisch neutralisiert. Hinzu kommt der Speicherraum, den ausgediente Erdgas- und Erdöllagerstätten bieten. In Deutschland haben ausgediente Erdgaslagerstätten an Land eine Speicherkapazität von rund 2,5 Milliarden Tonnen, Sandsteinformationen von gut neun Milliarden Tonnen.

Grundsätzlich ist die CCS-Technologie durch die wissenschaftliche Arbeit der letzten Jahre ausreichend erforscht und einsetzbar. Zwischen 1994 und 2005 hatten Forschungsprojekte zunächst das Ziel, die Technologie zu bewerten, Projekte zu konzipieren und zu analysieren, mit welchen rechtlichen und regulatorischen Systemen CCS künftig gesteuert werden könnte. Zwischen 2005 und 2015 wurden dann einzelne sehr große Anlagen gebaut. Für einen weiteren Betrieb sind diese allerdings auf finanzielle Unterstützung durch Fördergelder angewiesen, da es bislang kaum tragfähige Geschäftsmodelle gibt. Allein über den Handel mit Emissionszertifikaten lassen sich diese Anlagen bislang nicht finanzieren, da der Preis für emittiertes Kohlendioxid zu gering ist. Rentabel sind bisher nur jene CCS-Anlagen in den USA, bei denen das abgetrennte Kohlendioxid an die Mineralölindustrie weiterverkauft wird. Die Mineralölkonzerne pressen das Kohlendioxid in weitgehend ausgebeutete Lagerstätten, um so verbliebenes Gas und

dieses Verfahren den Vorteil, dass es Energie erzeugt und nicht nur verbraucht. Im Gegensatz zu Direct Air Capture benötigt BECCS zum Anbau der Pflanzen jedoch große Landflächen und gegebenenfalls Wasser und Dünger, steht also im Konflikt mit anderen Landnutzungsformen wie der Nahrungsmittelproduktion. Eine Alternative wäre die Verwendung von Algen als BECCS-Rohstoff, wodurch sich der Landnutzungskonflikt zum Teil entschärfen ließe.

### Potenzial und Maßstab

BECCS spielt eine entscheidende Rolle in den Emissions-szenarien des Weltklimarats zur Erreichung der Klimaziele und wird seit dem Pariser Klimaabkommen als wichtige Negative Emission Technology (NET, negative Emissionstechnologie) kontrovers diskutiert. Aktuelle Energie-Szenarien gehen davon aus, dass BECCS im günstigsten Fall bis zu 20 Prozent des weltweiten Energiebedarfs decken könnte, wobei die Schätzungen hier deutlich auseinandergehen. Würde man in den kommenden Jahren beginnen, die BECCS-Technologie aufzubauen, könnten damit laut verschiedenen wissenschaftlichen

Studien ab dem Jahr 2050 jährlich weltweit zwischen 2,4 und elf Milliarden Tonnen Kohlendioxid aus der Atmosphäre entfernt werden. Dies setzt voraus, dass in diesem Ausmaß auch rechtzeitig geologische Speicherstätten erschlossen werden, was zumindest in Deutschland aufgrund großer Widerstände in Politik und Gesellschaft aktuell nur schwer vorstellbar ist.

Um eine Kohlendioxid-Reduktion der oben erwähnten Größenordnung zu erreichen, wäre für den Anbau von Energiepflanzen eine Landfläche von rund einer bis vier Millionen Quadratkilometern nötig – was immerhin bis zu einem Drittel der heutigen weltweiten Ackerfläche entspricht.

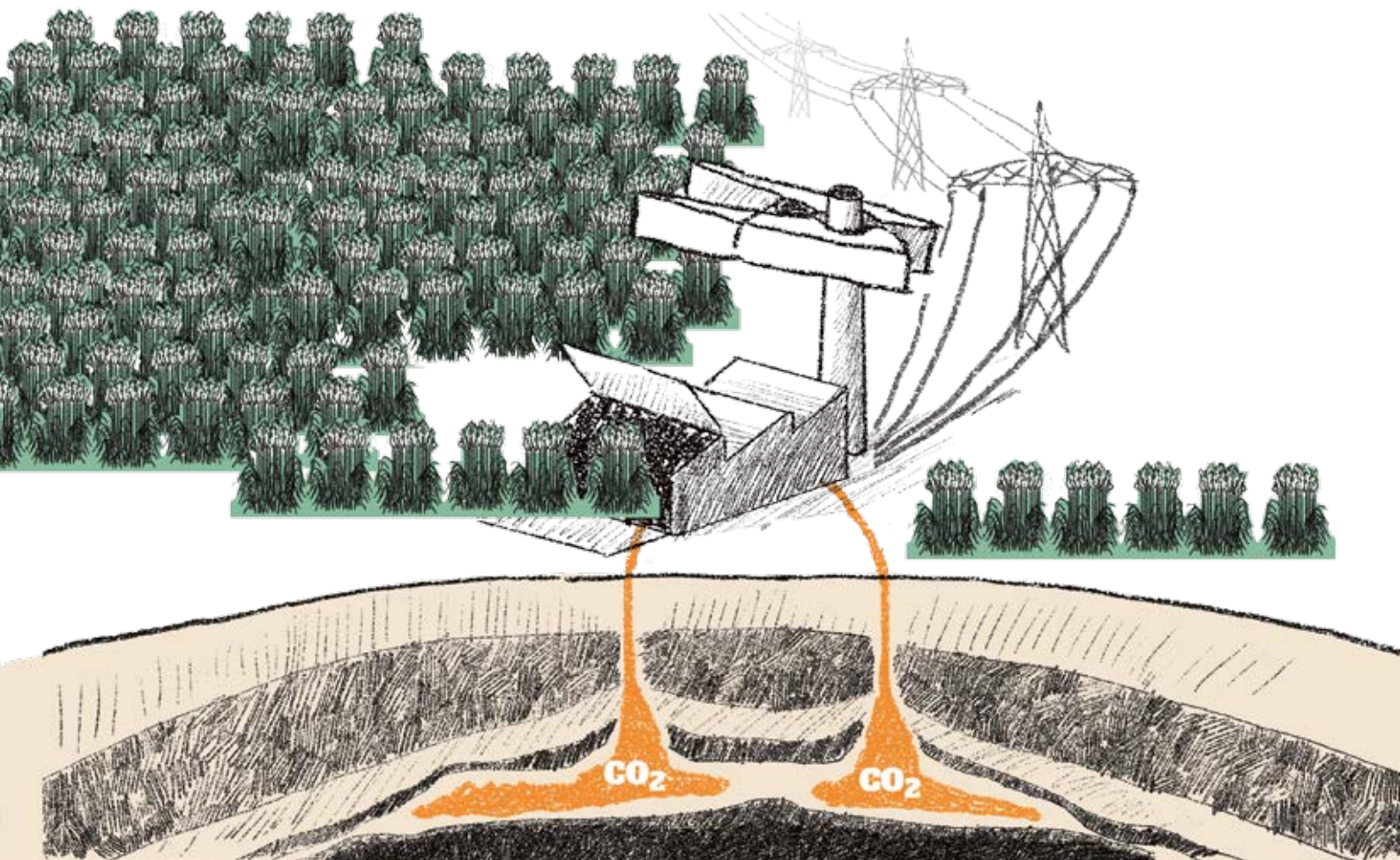
Ein weiteres großes Problem von BECCS ist, dass der Anbau von Energiepflanzen genau wie die Aufforstung mit Blick auf Flächen-, Wasser- und Düngerbedarf in Konkurrenz zur Kultivierung von Nahrungspflanzen steht. Angesichts des Wachstums der Weltbevölkerung und des wachsenden Bedarfs an Nahrungsmitteln wird inzwischen bezweifelt, dass BECCS in großer Dimension als CDR-Methode infrage kommt.

Öl zu gewinnen. Weltweit und insbesondere in den USA laufen in nächster Zeit viele Förderprogramme zur CCS-Forschung aus. Da kaum neue Förderprogramme auf der Agenda stehen, könnte nach 2020 der Fall eintreten, dass bereits bestehende CCS-Projekte den Betrieb einstellen müssen und zudem keine neuen Forschungsprojekte genehmigt werden.

Die Internationale Energieagentur in Paris hat in Szenarien errechnet, dass im Jahr 2050 CCS-Anlagen mit einer Jahreskapazität von sechs Milliarden Tonnen Kohlendioxid für BECCS oder Direct Air Capture zur Verfügung stehen müssten, um das 2-Grad-Ziel zu erreichen. Dafür müssten künftig eine ganze Reihe neuer Anlagen in Betrieb gehen. Vorausgesetzt, dass die Förderung von CCS-Projekten in etwa im gleichen Umfang wie in den vergangenen Jahren betrieben würde, werden 2050 allerdings nur Anlagen mit einer Kapazität von rund 700 Millionen Tonnen zur Verfügung stehen.

Da CCS bzw. die Speicherung von Kohlendioxid im Boden umstritten ist, erscheint ein Einsatz in vielen Staaten nur dann denkbar, wenn Chancen und Risiken durch weitere Forschung für jeden Standort genau analysiert werden und die

gesellschaftliche Akzeptanz der Technologie erhöht werden kann. Würde man die CCS-Forschung hingegen weiter drosseln, würde man damit auch die Entwicklung von Fachwissen für eine Kohlendioxid-Speicherung im Rahmen von BECCS und Direct Air Capture ausschließen. Eine sorgfältige Prüfung des Untergrunds und die Auswahl geeigneter Speicherstätten dauert typischerweise mindestens zehn Jahre; weitere fünf Jahre werden benötigt, um eine spezifische Anlage zu bewerten und die notwendigen Genehmigungen zu bekommen. Wird die Forschung jetzt ausgesetzt, schiebt man damit auch den Startpunkt für einen möglichen Einsatz der CCS-Technologie im Zusammenhang mit BECCS und Direct Air Capture in die Zukunft. Dann wäre es vermutlich zu spät, um die Ziele des Pariser Klimaabkommens mit den bisher angedachten Methoden noch zu erreichen. Ein verantwortliches Handeln der Staaten wäre es, schon heute auf dem eigenen Hoheitsgebiet das Potenzial für eine künftige Speicherung von Kohlendioxid zu ermitteln, um die Option CCS in Kombination mit BECCS und Direct Air Capture offenzuhalten. Zudem sollten international Konzepte für praktikable Anreiz-, Kontroll- und Governance-Systeme für die Speicherung von Kohlendioxid entwickelt werden. ◆



### Anwendungsreife und Forschungsbedarf

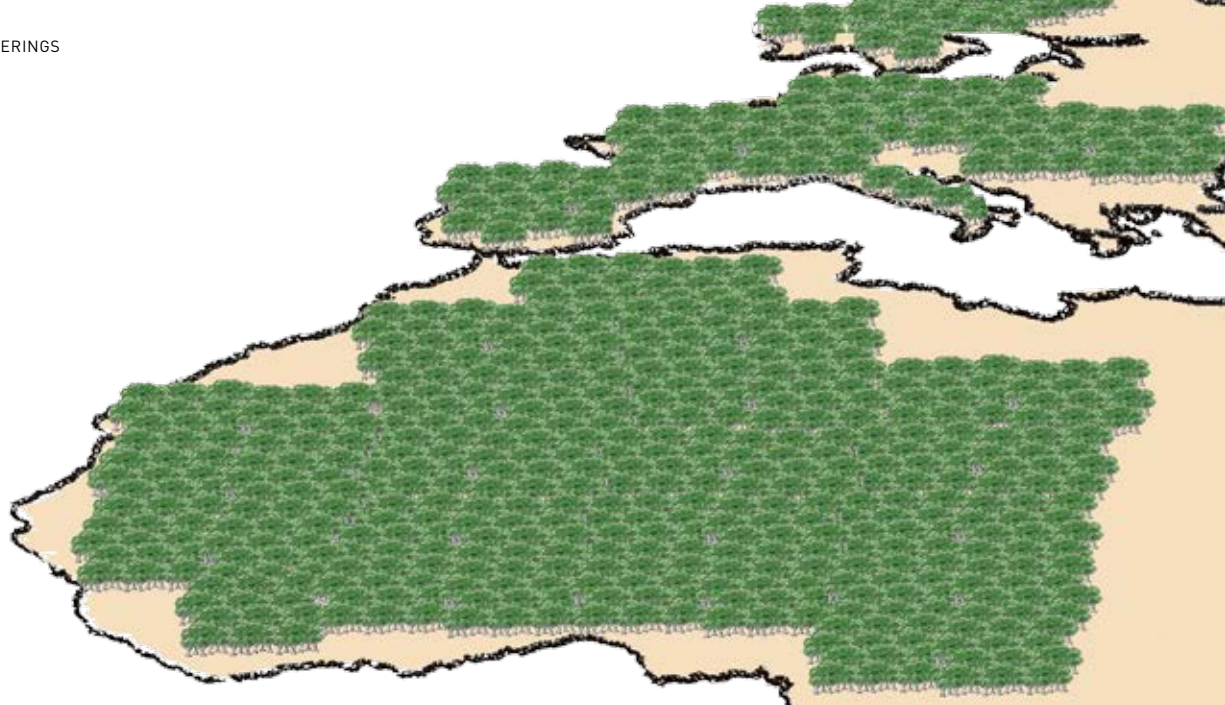
Bezüglich des Anbaus von Energiepflanzen im Rahmen von BECCS sind noch viele Fragen offen, insbesondere inwieweit der Anbau in großer Dimension den Druck auf die verbliebenen naturnahen Landflächen der Erde erhöhen, die Artenvielfalt verringern und zum Aussterben von Tier- und Pflanzenarten beitragen könnte. Unklar ist auch, inwieweit der Anbau im Hinblick auf Flächen- und Wasserkonkurrenz (Nahrungsmittel und naturnahe Flächen) vertretbar ist. Denn ein massiver Ausbau von bewässerten Plantagen könnte den Wassermangel in einigen Regionen der Welt drastisch verschärfen. Der Einsatz von BECCS ist auch davon abhängig, ob Lagerstätten zur Speicherung von Kohlendioxid in ausreichender Größe aufgebaut werden. Für die nahe Zukunft ist die Verfügbarkeit solcher Lagerstätten nicht absehbar. Aktuell wird versucht, die Wirtschaftlichkeit groß dimensionierter BECCS-Projekte genauer abzuschätzen.

### AUFFORSTUNG VON WÄLDERN

Das Aufforsten von Wäldern ist schon immer gängige Praxis der Forstwirtschaft gewesen. In der Regel dient das Aufforsten der Produktion von Holz oder der Renaturierung abgeholzter Flächen. Auch werden Wälder seit einigen Jahren als Kompensationsmaßnahme für den Ausstoß von Kohlendioxid

angepflanzt. Bäume lagern über die Photosynthese Kohlendioxid aus der Atmosphäre als Kohlenstoff in ihrem Holz ein. Je nach Lebensalter der Bäume bleibt der Kohlenstoff darin über mehrere Jahrhunderte gespeichert. Idealerweise sollte das Holz der Bäume nach diesem Zeitraum so genutzt werden, dass der Kohlenstoff weiter gebunden bleibt – etwa in Form von Bauholz. Bei Verbrennung des Holzes wird der Kohlenstoff dann wieder in Form von Kohlendioxid freigesetzt. Von Aufforsten als CDR-Methode spricht man dann, wenn es in großem Ausmaß und gezielt eingesetzt wird, um einen nennenswerten Beitrag zur Entnahme von Kohlendioxid aus der Atmosphäre zu leisten.

Bereits in den 1970er-Jahren gab es die Idee, die Sahara und andere große Wüsten zu begrünen. Doch Studien zeigen, dass die Nachteile überwiegen. Nicht zuletzt müssten große Mengen an Wasser bereitgestellt werden, um die Bäume zu kultivieren. Die Bewässerung wäre vermutlich teurer als heutige Maßnahmen zur Verringerung des Kohlendioxid-Ausstoßes und würde den regionalen Wassermangel drastisch verschärfen. Auch die Aufforstung nördlicher Tundra-Gebiete wird seit Langem diskutiert. Doch auch dies hätte negative Folgen, weil dadurch das Vermögen der Erdoberfläche, Wärmestrahlung der Sonne zurückzuwerfen, die sogenannte Albedo, verringert werden könnte. Die heutige Tundra ist im Winter von Eis und Schnee



bedeckt. Diese weiße Fläche reflektiert die Sonnenstrahlung zum Teil von der Erde zurück ins All. Wälder hingegen erscheinen im Winter dunkler, wodurch sie mehr Wärmestrahlung aufnehmen. Diese Verringerung der Albedo wäre also kontraproduktiv und stünde dem eigentlichen Ziel der Aufforstung der Tundra, das Aufheizen der Erde zu verhindern, entgegen.

Darüber hinaus würde eine massive Aufforstung in den mittleren und niederen Breiten den Wasseraustausch mit der Atmosphäre ankurbeln. Die Blattflächen der Bäume schwitzen Wasser aus, welches daraufhin verdunstet. Gleich dem Effekt einer Oase kühlt dabei die Umgebungsluft ab. Die Kondensationswärme wird bei der Bildung von Niederschlag an anderer Stelle wieder frei. Der zusätzliche Wasserdampf kann sich außerdem auf Wolkenbildung und Strahlungsbilanz auswirken. Eine Aufforstung kann somit je nach Region lokal und global gegensätzliche Effekte haben und zum Teil dem eigentlichen Ziel, das Aufheizen der Erde zu verhindern, entgegenstehen.

### Potenzial und Maßstab

Nach optimistischen Schätzungen ließen sich durch großskaliges Aufforsten weltweit große Mengen Kohlenstoff binden. So könnten bis zum Jahr 2100 jährlich bis zu zehn Milliarden Tonnen CO<sub>2</sub> in Bäumen gespeichert werden. Dafür müsste man mindestens acht Millionen Quadratkilometer Flächen bepflanzen, die für andere Nutzungen aufgegeben wurden. Dies entspricht in etwa der Größe Brasiliens. Damit könnte Aufforstung als Ergänzung zu einer drastischen Emissionsreduktion einen Teil zur erforderlichen CO<sub>2</sub>-Entnahme aus der Atmosphäre beitragen. Wollte man noch größere Flächen aufforsten, stünde diese CDR-Maßnahme anderen Nutzungen wie der als Weideland, dem Anbau von Energiepflanzen oder der Kultivierung von Nahrungspflanzen entgegen. So gehen Schätzungen davon aus, dass mit der Zunahme der Weltbevölkerung und dem Ausbau der Landwirtschaft künftig kaum noch Landflächen für Aufforstungsprojekte zur Verfügung stehen werden.

### Anwendungsreife und Forschungsbedarf

In den vergangenen Jahren haben Experten das Für und Wider der großflächigen Aufforstung genauer untersucht. In mathematischen Modellen versuchen Wissenschaftler zu ermitteln, wie groß die tatsächlichen Potenziale der Kohlendioxid-Entnahme durch Aufforstung sind und mit welchen Folgen für Mensch und Umwelt zu rechnen ist. Immer detaillierter wird zudem untersucht, wie viele Emissionen bei der Aufforstung zum Beispiel aus den Böden frei werden, welche Folgen Aufforstung für Strahlungs- und Wasserhaushalt hat und wie hoch die Kosten der Waldwirtschaft sind. Forscher untersuchen zudem energie- und emissionsparende Bewässerungs- und Düngetechnologien sowie nachhaltige Anbaustrategien unter Einbezug ökologischer und sozialwirtschaftlicher Aspekte. Unwägbar bleiben dabei das Wachstum der Weltbevölkerung und der Ausbau der Nahrungsmittelproduktion, was eine genaue Abschätzung des möglichen Potenzials erschwert.

### ERZEUGUNG VON PFLANZENKOHLE

Eine weitere Methode, um die Kohlendioxid-Aufnahme der Pflanzen für die langfristige Speicherung von CO<sub>2</sub> zu nutzen, ist die Herstellung von Pflanzenkohle. Bei diesem Verfahren, der sogenannten Pyrolyse, werden Pflanzen oder Pflanzenabfälle unter Abwesenheit von Sauerstoff auf mehrere Hundert Grad Celsius erhitzt und dadurch in eine feste, kohleartige Substanz umgewandelt. Als Nebenprodukte entstehen Biogas und Bioöl, mit denen man fossile Energierohstoffe ersetzen kann. Mit der Pyrolyse lassen sich Erntereste, Grünschnitt, Viehmist, Gülle, Klärschlamm und andere Bioabfälle verarbeiten. Anders als Holzkohle ist die Pflanzenkohle nicht zum Verbrennen gedacht. Vielmehr kann sie in Ackerböden eingearbeitet werden, wodurch sie lange Zeit im Boden gespeichert wird. Denn durch ihre stabilen Strukturen wird die Pflanzenkohle nur sehr langsam zersetzt. Der in ihr enthaltene Kohlenstoff bleibt folglich





lange gespeichert. Außerdem verbessert die Pflanzenkohle die Bodeneigenschaften, indem Wasser und Nährstoffe besser im Boden gehalten werden können. Somit können mehr Pflanzen produziert werden, was dem Klimawandel zusätzlich entgegenwirken könnte.

Im Gegensatz zu BECCS hat Pflanzenkohle den Vorteil, dass dafür nicht unbedingt eigens Pflanzen angebaut werden müssen, da eben auch Pflanzenabfälle für die Herstellung geeignet sind. Eine direkte Konkurrenz zur Nahrungsmittelproduktion kann so vermieden werden. Allerdings ergibt sich ein etwas anderes Bild, wenn Pflanzenkohle in großem Stil als CDR-Methode eingesetzt werden soll. Um jährlich mehrere Milliarden Tonnen Kohlendioxid aus der Atmosphäre zu entfernen, müssten auf mehreren Hundert Millionen Hektar Miscanthus oder ähnlich schnell wachsende Pflanzen angebaut werden. Diese liefern jedoch kaum Nahrungsmittel – so entstünde auch hier eine Konkurrenzsituation zur Nahrungsmittelproduktion, vergleichbar mit der bei BECCS. Ein grundsätzlicher Vorteil der Pflanzenkohle ist, dass sie vor Ort in vielen Ländern – vor allem auch in den Schwellen- und Entwicklungsländern – in kleinen Anlagen hergestellt werden kann, da das Verfahren technisch leicht umsetzbar ist.

### **Potenzial und Maßstab**

Würde man in den kommenden Jahren beginnen, die Pflanzenkohle-Verfahren aufzubauen, könnten laut verschiedenen wissenschaftlichen Studien künftig jährlich weltweit 0,5 bis zwei Milliarden Tonnen Kohlendioxid aus der Atmosphäre entfernt werden. Hier ist es allerdings ausschlaggebend, ob allein Pflanzenabfälle genutzt werden oder zusätzlich schnell wachsende Pflanzen eigens für die Pflanzenkohleproduktion kultiviert werden müssten.

Um Kohlendioxid im Milliarden-Tonnen-Maßstab binden zu können, wäre die dafür benötigte Fläche sehr groß. Doch selbst wenn man nur Pflanzenabfälle zur Pflanzenkohleproduktion nutzte, könnte diese einen gewissen Beitrag leisten: Für Europa gibt es Abschätzungen, dass sich rund zehn Prozent der jährlichen Kohlendioxid-Emissionen kompensieren ließen, wenn

Biomasse-Abfälle europaweit zu Pflanzenkohle verarbeitet würden. Zusätzliche Landfläche würde dafür nicht benötigt werden.

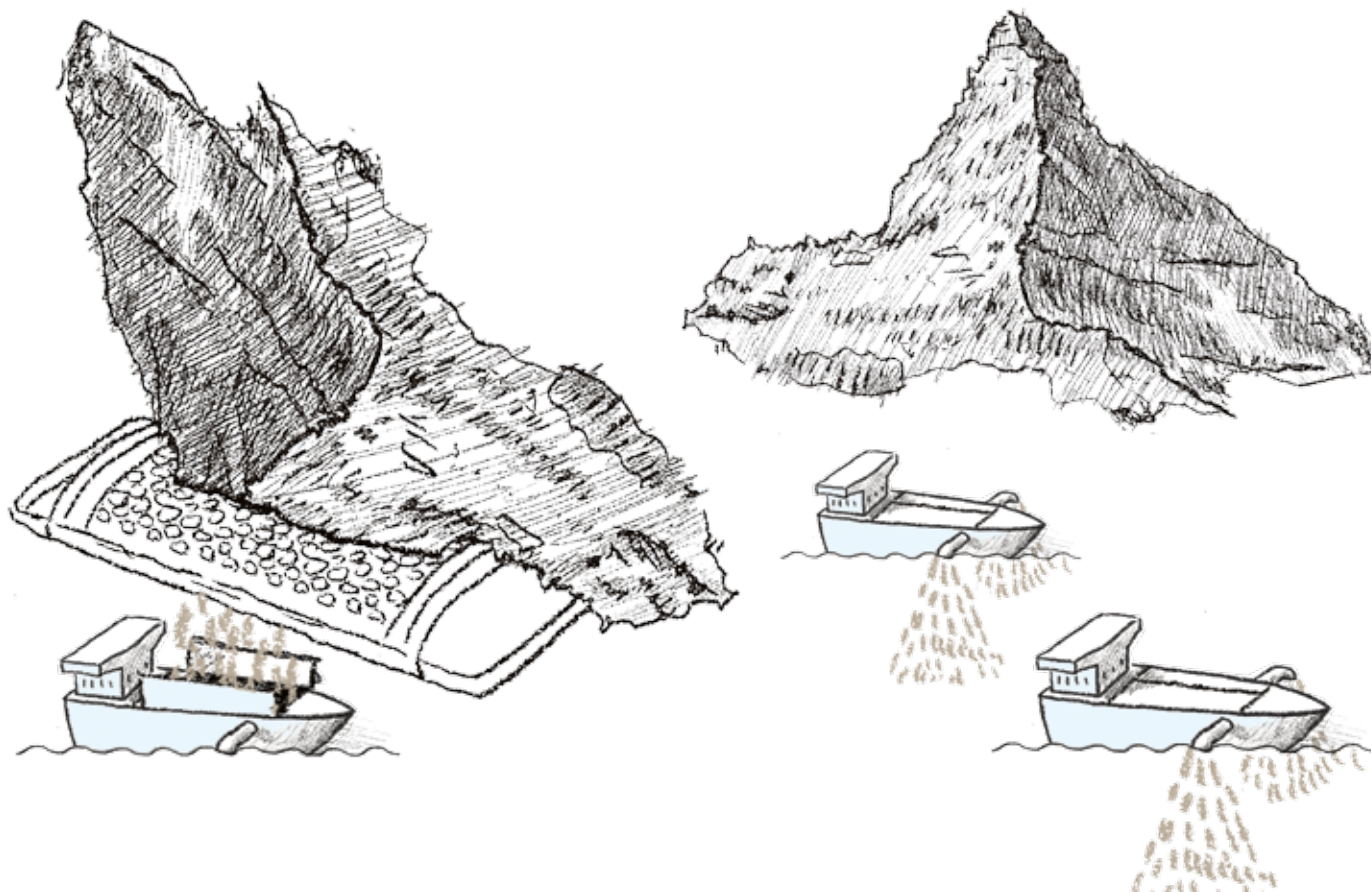
### **Anwendungsreife und Forschungsbedarf**

Die Pflanzenkohle eignet sich nicht nur zur Verbesserung der Bodenqualität. Erforscht wird auch die Nutzung der Abwärme der Anlagen, die Verwendung der Pflanzenkohle als Düngemittelträger, als Sandersatz in Baustoffen oder als Kohle für medizinische Anwendungen. Für das Bioöl wird die Produktion von Bioplastik untersucht.

Die Technik zur Herstellung von Pflanzenkohle ist ausgereift und wurde bereits in großen Pilotanlagen zur Industriereife entwickelt. Unklar ist, in welchen Mengen Pflanzenkohle in der Landwirtschaft oder allgemein in die Umwelt ausgebracht werden kann. Zwar hat sie das Potenzial, Kohlenstoff langfristig zu speichern. Noch aber fehlt es an detaillierten Untersuchungen, wie sich Pflanzenkohle in großen Mengen in der Umwelt verhält.

## **ERHÖHUNG DER SPEICHERFÄHIGKEIT VON BÖDEN**

Diskutiert wird auch, inwieweit sich durch eine Änderung landwirtschaftlicher Techniken die Aufnahme von Kohlenstoff in Böden verstärken lässt. Fachleute bezeichnen diese Methode als Soil Carbon Enhancement (Erhöhung des Boden-Kohlenstoffs). Die hierunter zusammengefassten Techniken werden meist zu den Natural Climate Solutions gezählt. In den vergangenen Jahren sind weltweit viele einzelne Forschungsprojekte zu diesem Thema durchgeführt worden. So wurde unter anderem gezeigt, dass der Boden durch verstärktes Einarbeiten von Ernteresten oder auch durch die Einsaat von Zwischenfrüchten deutlich mehr Kohlenstoff speichern kann. In anderen Studien wird untersucht, ob sich durch die Züchtung von tiefer wurzelnden Kulturen oder mehrjährigen Getreidesorten ein ähnlicher Effekt erreichen lässt. Auch Pflügen spielt eine Rolle. Verzichtet man auf tiefes Pflügen und passt die Aussaat



daran an, verlangsamen sich die biologischen Abbauprozesse im Boden, sodass Kohlenstoff angereichert wird. Gemäß unterschiedlichen wissenschaftlichen Schätzungen könnten Böden weltweit durch angepasste landwirtschaftliche Techniken jährlich 0,7 bis elf Milliarden Tonnen Kohlendioxid speichern. Der Unsicherheitsbereich ist allerdings groß, da unklar ist, wie permanent die Speicherung ist und welche Rolle Einmaleffekte, zum Beispiel beim Umschalten von tiefem auf flacheres Pflügen, spielen.

## CDR-METHODEN → ANWENDUNGEN IM OZEAN

### BESCHLEUNIGTE VERWITTERUNG

Rund ein Viertel des durch die Verbrennung fossiler Rohstoffe ausgestoßenen Kohlendioxids wird durch natürliche Prozesse von den Meeren aufgenommen. Dies führt zur Bildung von Kohlensäure und ist verantwortlich für die zunehmende Versauerung des Ozeans. Die Ozeanversauerung kann weitreichende negative Effekte auf Nahrungsketten und Artenvielfalt haben; sie hat zudem den Effekt, dass sich zum Beispiel kalkhaltige Sedimente oder Organismen wie Korallen verstärkt auflösen. Der Ozeanversauerung entgegen wirkt die natürliche Verwitterung. Dabei werden mineralische Bestandteile aus dem Gestein gelöst, vom Land ins Meer geschwemmt und

so in Form von Bikarbonat- und Karbonat-Ionen permanent im Meerwasser gebunden. Damit verändern sich die chemischen Eigenschaften des Meerwasser – es wird basischer. Wenn dieser Prozess im Oberflächenwasser in Kontakt mit der Atmosphäre stattfindet, kann das durch Verwitterung aus dem Wasser entfernte  $\text{CO}_2$  durch Kohlendioxid ersetzt werden, das aus der Atmosphäre nachströmt.

Als eine CDR-Methode im Meer wird deshalb die auch schon unter landbasierten Methoden diskutierte beschleunigte Verwitterung angedacht. Für die chemische Bindung von Kohlendioxid werden basische Substanzen, zum Beispiel Silikat- oder Karbonatgesteinsmehl, direkt ins Oberflächenwasser des Ozeans eingeleitet. Die Materialien können an Land in Minen abgebaut bzw. industriell hergestellt, per Schiff aufs Meer transportiert und dort im Wasser verteilt werden. Bei Anwendung dieser Methode könnte der Ozean nicht nur mehr Kohlendioxid aufnehmen. Als positiver Nebeneffekt würde dies zugleich der Ozeanversauerung entgegenwirken.

### Potenzial

Grundsätzlich gibt es weltweit ausreichend Mineralien, um damit alle Kohlendioxid-Emissionen zu binden. Diese Mineralien müssten abgebaut und zu einem feinen Pulver zermahlen oder in einem industriellen Prozess chemisch aufbereitet werden, damit sie sich schnell im Wasser auflösen und nicht in die Tiefe absinken, bevor sie mit dem Kohlendioxid reagieren. Unlängst wurden existierende Studien daraufhin analysiert, welches Potenzial die beschleunigte Verwitterung



haben könnte. Das Ergebnis: Vorausgesetzt man begänne umgehend damit, diese CDR-Methode aufzubauen, könnten ab 2050 jährlich zwischen zehn Millionen und fünf Milliarden Tonnen Kohlendioxid aus der Atmosphäre entfernt werden.

### Maßstab

Damit die beschleunigte Verwitterung einen globalen Effekt erreicht, müsste für die benötigte Menge an Mineralien ein ganz neuer Bergbau in großer Dimension etabliert bzw. eine große industrielle Fertigung aufgebaut werden. Denn um den weltweiten Kohlendioxid-Ausstoß zu kompensieren, müssten pro Jahr Mineralien in einem Umfang ausgebracht werden, der mit der Menge der heutzutage abgebauten Kohle vergleichbar ist. Hinzu kommt, dass das feine Mineralpulver entweder in Anlagen an Land im Meerwasser gelöst und anschließend ins Meer geleitet oder mit großen Frachtschiffen aufs Meer hinaus transportiert werden müsste. In der Summe wäre diese CDR-Methode kostspielig, energieintensiv und auch an Land ein großer Eingriff.

### Anwendungsreife und Forschungsbedarf

Wie wirksam die beschleunigte Verwitterung auf globaler Skala sein könnte, was sie kostet und ob sie sich energetisch lohnt, wird derzeit mithilfe von Modellrechnungen und zum Teil in kleinen Laborexperimenten untersucht. Um diese Modellrechnungen noch genauer zu machen, bräuchte es Daten aus größeren, räumlich begrenzten Feldexperimenten. Damit ließe sich exakter bestimmen, wie viel zusätzliches Kohlendioxid durch die Mineralienanreicherung des Meerwassers aufgenommen werden würde. Zugleich könnten Erkenntnisse über die Auswirkungen der erhöhten Mineralienkonzentration auf die Meereslebewesen gewonnen werden. Manche Gesteine enthalten Eisen, das im Meer als Dünger wirkt, möglicherweise aber auch giftig wirkende Verunreinigungen, was zu unbeabsichtigten Nebenwirkungen auf Meeresökosysteme führen könnte.

## EISENDÜNGUNG DES OZEANS

Pflanzen an Land und Algen im Meer erzeugen Energie mithilfe der Photosynthese. Dabei nehmen sie Kohlendioxid aus der Luft auf. Allein das pflanzliche Plankton im Meer erbringt etwa die Hälfte der weltweiten Photosynthese-Leistung und nimmt damit insgesamt große Mengen Kohlendioxid aus der

Atmosphäre auf. Über die Nahrungskette gelangt das gespeicherte Kohlendioxid dann in weitere Meeresorganismen wie Kleinkrebse, Fische oder Wale. Sterben die Organismen, sinken sie ab. Ein Großteil dieser Biomasse wird dabei von Bakterien verwertet, wobei das in den Lebewesen gespeicherte Kohlendioxid wieder an das umgebende Wasser abgegeben wird und über die Ozeanzirkulation irgendwann wieder in Kontakt mit der Atmosphäre gelangt. Ein kleiner Teil der Biomasse sinkt in die Tiefsee, wo er ins Sediment am Meeresgrund eingelagert wird. Damit wird ein Teil des ursprünglich im Plankton gespeicherten Kohlendioxids der Atmosphäre für lange Zeit entzogen.

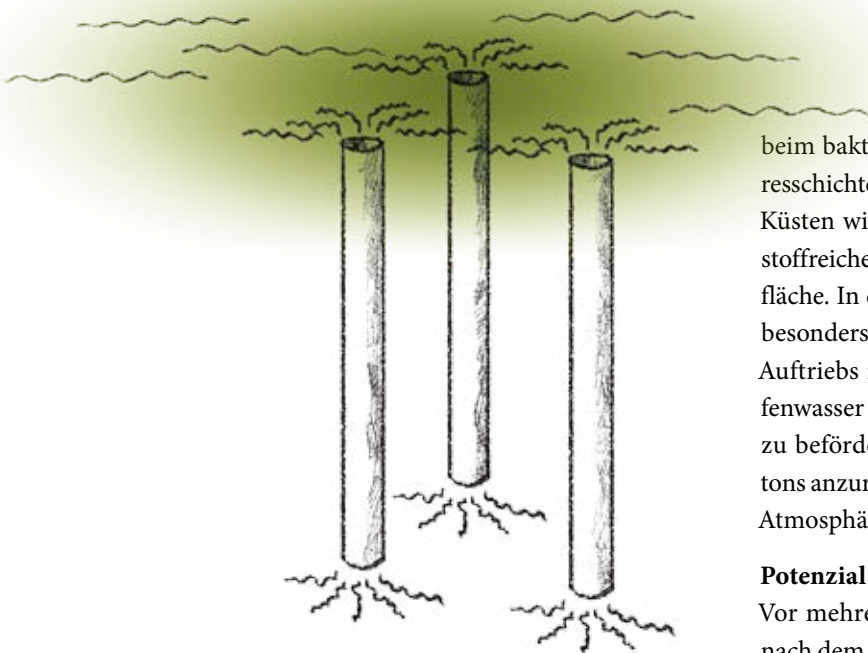
Da in einem Viertel der Weltmeere ein natürlicher Mangel an Pflanzennährstoffen, insbesondere Eisen, herrscht, haben Experten bereits vor Jahren die Idee der künstlichen Eisendüngung entwickelt. Durch Düngung mit relativ kleinen Mengen Eisen ließe sich das Planktonwachstum beachtlich ankurbeln, sodass sich die Aufnahme von Kohlendioxid aus der Atmosphäre verstärken würde. Damit könnte letztlich auch mehr Kohlendioxid durch die abgestorbene Biomasse in die Tiefsee transportiert werden. Mit Experimenten im Labor und auf dem Meer konnte gezeigt werden, dass das Phytoplankton nach Gabe von eisenhaltigem Pulver tatsächlich stark wächst.

### Potenzial und Maßstab

Die Experimente zeigen, dass durch die Eisendüngung das Planktonwachstum und die Kohlendioxid-Aufnahme zunehmen. Allerdings ist die Menge Plankton, die tatsächlich in die Tiefe absinkt und damit der Atmosphäre langfristig Kohlendioxid entzieht, gering. Würde man in den kommenden Jahren beginnen, die Eisendüngung des Ozeans großskalig aufzubauen, könnten laut verschiedener wissenschaftlicher Studien ab dem Jahr 2050 jährlich weltweit zwischen 200 Millionen und zwei Milliarden Tonnen Kohlendioxid aus der Atmosphäre entfernt werden. Um einen globalen Effekt zu erreichen, müsste aber mindestens der gesamte Südliche Ozean permanent mit Eisen gedüngt werden.

### Anwendungsreife und Forschungsbedarf

Nachdem mehrere Freilandexperimente durchgeführt worden sind, nehmen inzwischen viele Wissenschaftler Abstand von der Idee der Eisendüngung als CDR-Methode, auch weil die Nebeneffekte, die die Düngung auf die Lebensgemeinschaften



im Meer haben könnte, kaum abzusehen sind. So könnte es in den Ozeanen zu Effekten kommen, die man aus küstennahen Meeresgebieten kennt, die heute mit Nährstoffen überdüngt sind. Durch das Zuviel an Nährstoffen könnte es nach starken Planktonblüten und deren sauerstoffzehrenden bakteriellen Abbau zu sauerstoffarmen oder gar -freien Gebieten kommen. Als Nebeneffekt bildet sich zudem verstärkt Lachgas, ein starkes Treibhausgas, das aus dem Meer in die Atmosphäre aufsteigen kann. Dies würde die CDR-Methode teilweise konterkarieren. Ebenfalls kontraproduktiv wäre ein weiterer Mechanismus: Modellrechnungen zeigen, dass nach Beendigung der Düngung höchstwahrscheinlich ein Großteil des vom Meer aufgenommenen Kohlendioxids auf Zeitskalen von Jahrzehnten bis Jahrhunderten wieder in die Atmosphäre zurückkehren würde. Damit könnte die Kohlendioxid-Konzentration in der Atmosphäre nach Beendigung der Maßnahmen wieder ansteigen.

## KÜNSTLICHER AUFTRIEB IM MEER

Ähnlich wie die künstliche Düngung von Meeresgebieten hat dieser CDR-Ansatz das Ziel, die nährstoffarmen Meeresregionen mit zusätzlichen Nährstoffen zu versorgen, um das Wachstum des pflanzlichen Planktons anzukurbeln. Tatsache ist, dass die lichtdurchfluteten Bereiche der Meere, in denen pflanzliches Plankton wächst, arm an Nährstoffen sind. Schon in wenigen Hundert Metern Tiefe sieht es anders aus. Durch den bakteriellen Abbau von Biomasse, die langsam von der Meeresoberfläche in die Tiefe absinkt, werden hier viele Nährstoffe wieder ins Wasser abgegeben – allerdings eben auch CO<sub>2</sub>, das

beim bakteriellen Abbau ebenfalls entsteht. Die tieferen Meeresschichten sind also in der Regel nährstoffreich. An manchen Küsten wie etwa vor Namibia oder Peru gelangt dieses nährstoffreiche Tiefenwasser durch Strömungen an die Meeresoberfläche. In diesen sogenannten Auftriebsgebieten gibt es daher besonders viel Plankton und Fische. Die Idee des künstlichen Auftriebs ist es, mithilfe großer Pumpen und Rohre das Tiefenwasser auch in anderen Gebieten an die Meeresoberfläche zu befördern, um so das Wachstum des pflanzlichen Planktons anzuregen – und die Aufnahme von Kohlendioxid aus der Atmosphäre zu verstärken.

### Potenzial

Vor mehreren Jahren hat eine Firma ein Patent angemeldet, nach dem man schwimmende Pumpen bauen könnte, die sich mit Strom aus Wellenenergie versorgen ließen. Insgesamt wäre das Potenzial dieser Methode, mit weniger als einer Milliarde Tonnen Kohlendioxid pro Jahr, allerdings relativ gering. Dies liegt vor allem daran, dass das nährstoffreiche Tiefenwasser auch reich an Kohlendioxid ist, welches aus der Tiefe an die Meeresoberfläche geholt und damit dem Düngeeffekt entgegenwirken würde.

### Maßstab

Die Ergebnisse von Computermodellen zeigen, dass sehr viele Pumpen erforderlich wären, um eine klimarelevante Menge an Kohlendioxid durch das verstärkte Wachstum des pflanzlichen Planktons zu binden. Im Falle der erwähnten Pumpentechnologie würde man weltweit mehrere Millionen Pumpen benötigen, um nennenswerte Mengen umzuwälzen. Insgesamt müsste auf etwa 50 Prozent der Meeresoberfläche künstlicher Auftrieb erzeugt werden – ein enormer technischer Aufwand.

### Anwendungsreife und Forschungsbedarf

Aktuell gibt es in China, Japan und auch in Europa Forschungsprojekte, in denen der künstliche Auftrieb getestet wird. Diese Projekte haben aber das primäre Ziel zu untersuchen, inwieweit sich durch die Nährstoffzufuhr aus der Tiefe die Fischproduktion erhöhen lässt. Großskalige Versuche, die im Kontext Climate Engineering stattfinden, gibt es derzeit nicht. Modellrechnungen zeigen, dass der künstliche Auftrieb durchaus problematisch sein kann. Durch die Umverteilung von kaltem Wasser an die Meeresoberfläche würde sich die Atmosphäre zwar als positiver Nebeneffekt über dem Meer abkühlen. Unmittelbar nach Abschaltung der Pumpen würde sich der Effekt jedoch umkehren. Die durch die Umwälzung nach unten gedrückte Wärme würde schnell an die Meeresoberfläche



auftreiben und in die Atmosphäre entweichen, wodurch sich das Aufheizen des Planeten sehr schnell verstärken würde. Dieser Effekt wäre nach den Modellrechnungen sogar stärker, als wenn man die Methode des künstlichen Auftriebs nie eingesetzt hätte. Die Temperaturen wären für Jahrzehnte oder gar Jahrhunderte höher, als diejenigen, die sich bei einem Business-as-usual-Szenario ergeben – also wenn Klimaschutz weiterhin in dem langsamen Tempo vorangebracht würde, wie es gegenwärtig der Fall ist. Letztlich haben die meisten Forscher inzwischen auch aufgrund der unabsehbaren Konsequenzen für die Meereslebensräume Abstand vom Konzept des künstlichen Auftriebs als CDR-Methode genommen.

## STRAHLUNGSMANAGEMENT

Die Temperatur der Erdatmosphäre wird, vereinfacht, durch drei Größen bestimmt, die mit der Sonnenstrahlung zusammenhängen. Die wichtigste Größe ist die einfallende kurzwellige Sonnenstrahlung, die die Erde mit Energie versorgt. Die zweite ist die Reflexion dieser Strahlung an Wolken, an Partikeln in der Erdatmosphäre oder am Eis der Polarregionen. Durch diese Reflexion kehrt ein Teil der Sonnenenergie, die auf die Erde trifft, sofort wieder in das Weltall zurück. Die dritte Größe im globalen Wärmebudget ist die sogenannte langwellige Wärmestrahlung. Diese entsteht, wenn die Erd- oder Meeresoberfläche Sonnenenergie in Form langwelliger Wärmestrahlung wieder an die Atmosphäre abgibt. Ein Teil dieser von der Planetenoberfläche abgestrahlten langwelligeren Wärmestrahlung wird von den Treibhausgasen zunächst absorbiert und dann in alle Richtungen wieder abgestrahlt – unter anderem zurück nach unten, wo dieselbe Strahlung dann noch einmal zur Erwärmung der Erde führt. Es ist demnach die langwellige Strahlung, die den Treibhauseffekt bewirkt. Methoden des Strahlungsmanagements (Radiation Management, RM) setzen dagegen fast alle an einer verstärkten Reflexion der einfallenden kurzwelligen Sonnenstrahlung an.

## STRAHLUNGSMANAGEMENT → REFLEKTIERENDE AEROSOLE

Eine Idee ist, in den oberen Schichten der Atmosphäre, der Stratosphäre (15 bis 50 Kilometer Höhe), reflektierende Partikel (Aerosole) auszubringen, die die kurzwellige Sonnenstrahlung direkt ins All zurückwerfen. Damit gelangt insgesamt weniger Sonnenstrahlung zum Erdboden, sodass die Erwärmung reduziert wird.

### SULFAT-AEROSOLE

Als reflektierende Aerosole werden vor allem Sulfat-Aerosole diskutiert: Bei Vulkanausbrüchen werden auf natürliche Weise große Mengen der Schwefelverbindung Sulfat bis in die Stratosphäre geschleudert. Seit Langem ist bekannt, dass diese Ascheteilchen das kurzwellige Sonnenlicht reflektieren. Bei großen Vulkanausbrüchen kann es dadurch zu einer globalen Abkühlung kommen. Bereits in den 1970er-Jahren gab es erste Vorschläge, die Erderwärmung durch das Ausbringen von Sulfat-Aerosolen in die Stratosphäre zu verlangsamen. Da sich in der Stratosphäre kein Niederschlag bildet, der das Sulfat auswaschen könnte, verbleiben die Partikel relativ lange in der Höhe. Schätzungen gehen von ein bis zwei Jahren aus.

### Potenzial

Wie die großen Vulkanausbrüche zeigen, könnte die Verteilung von Sulfat-Aerosolen in einer solchen Größenordnung in der Stratosphäre eine abkühlende Wirkung von einigen Zehntel Grad Celsius haben. Neuere Studien heben aber hervor, dass die für eine stärkere Abkühlung benötigten Sulfatmengen größer sind als bisher angenommen. Zugleich würden sich bei zu hohen Partikelkonzentrationen Klumpen bilden, die schneller absinken. Grundsätzlich stellt sich zudem die Frage, wie die Verteilung der erforderlichen Mengen an Sulfat technisch umgesetzt werden könnte. Seit einigen Jahren gibt es ein Patent, nach dem Sulfat durch Treibstoffzusätze in Flugbenzin von Verkehrsflugzeugen verteilt werden könnte. US-Forscher verfolgen die Idee, Aerosole über einen Schlauch zu versprühen, der mit einem Ballon bis in die Stratosphäre gezogen wird.

### Maßstab

Beim Ausbruch des philippinischen Vulkans Pinatubo im Jahr 1992 wurden schätzungsweise 15 bis 20 Millionen Tonnen Schwefeldioxid in die Stratosphäre getragen. Diese Menge

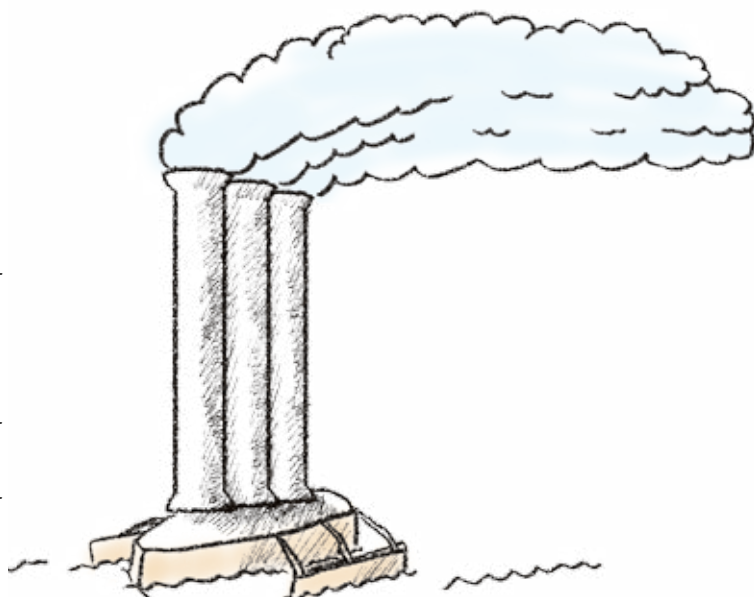
führte in den folgenden Monaten zu einer weltweiten Abkühlung um durchschnittlich rund ein halbes Grad Celsius. Zwar ist ein Vulkanausbruch ein singuläres Ereignis, das anders als gezieltes Strahlungsmanagement mit einem Schlag viel Material in die Stratosphäre trägt, dennoch macht dieses Beispiel deutlich, in welcher Größenordnung Sulfat-Aerosole in der Stratosphäre verteilt werden müssten, um einen klimarelevanten Effekt zu erzielen.

### Anwendungsreife und Forschungsbedarf

Da es bislang keine ausgereiften und wirtschaftlichen Technologien gibt, mit denen man die erforderlichen Sulfatmengen in eine Höhe von 20 bis 25 Kilometern transportieren kann, ist diese RM-Maßnahme bis auf weiteres hypothetisch. Zudem sind die Risiken dieser globalen Maßnahme trotz einiger Studien dazu noch unklar. So ist weitgehend unbekannt, inwieweit sich durch die Abschattung in großer Höhe die Verdunstung von Wasser an der Erdoberfläche und damit der globale Wasserkreislauf ändern könnten. Unklar ist bislang auch, ob das Sulfat den stratosphärischen Ozonabbau verstärken könnte. Zudem würden die Sulfatpartikel den Einfall von Sonnenstrahlung auf die Erde allgemein reduzieren und damit den Himmel zu einem gewissen Grad verdunkeln. Welche Auswirkungen das in der Summe zum Beispiel auf Pflanzenwachstum oder solare Energieerzeugung hätte, ist weitgehend ungeklärt.

## STRAHLUNGSMANAGEMENT → DURCH VERÄNDERUNG DER WOLKEN

Wolken spielen im Wärmehaushalt der Erde eine wichtige Rolle. Dabei wirken sie auf unterschiedliche Weise. Zum einen reflektieren sie Teile der kurzwelligen Sonnenstrahlung, wodurch sie kühlend wirken. Zum anderen absorbieren sie die von der Erdoberfläche abgegebene langwellige Wärmestrahlung und strahlen sie teilweise wieder Richtung Erdboden. Über diesen Treibhauseffekt wirken sie wärmend. Diskutiert werden seit mehr als 20 Jahren RM-Methoden, die an beiden Mechanismen ansetzen. Unklar ist, inwieweit die künstliche Veränderung von Wolken in diesem Ausmaß den Wasserkreislauf und Luftströmungen in den unteren Schichten der Atmosphäre beeinflussen und verändern würde. Wissenschaftler befürchten, dass dadurch Klimaveränderungen in verschiedenen Regionen der Erde ausgelöst werden könnten.



### VERSTÄRKUNG DER REFLEKTIERENDEN WIRKUNG VON WOLKEN ÜBER DEM MEER

Schon in den 1980er-Jahren erkannte man auf Satellitenbildern, dass sich an den Abgasfahnen von Schiffen über dem Meer unter bestimmten Bedingungen Wolken bilden und dass diese Wolken das kurzwellige Sonnenlicht ins All zurückstreuen. Dass Abgase besonders über entlegenen Meeresgebieten Wolken entstehen lassen, hat folgenden Grund: Für gewöhnlich ist die Luft über diesen Meeresgebieten besonders sauber. Sie enthält kaum Partikel, an denen die in der Luft enthaltene Feuchtigkeit kondensieren könnte. Setzt man in diesen Gebieten künstlich Partikel frei, wie das auch bei den Schiffsabgasen der Fall ist, erhöht man die Menge der Kondensationskeime, sodass sich mehr Wolkentröpfchen bilden. Vor einigen Jahren kam die Idee auf, über den Ozeanen Salzwasser zu versprühen, da sich die darin enthaltenen Salzkristalle sehr gut als Kondensationskeime eignen. So könnte man über weiten Teilen der Ozeane künstlich Wolken, die sogenannten Stratokumulus-Wolken, erzeugen, die die Reflexion des kurzwelligen Sonnenlichts verstärken und insgesamt zu einer Abkühlung der Erde führen könnten. Inwieweit es dadurch regional oder überregional zu Klimaänderungen kommen könnte, ist aber offen.

#### Potenzial und Maßstab

Das Potenzial dieser Methode gilt als groß. Man schätzt, dass sich etwa drei Prozent der Erdoberfläche besonders für die künstliche Veränderung von Stratokumulus-Wolken eignen. Als besonders ergiebig gelten die Meeresgebiete der südlichen Ozeanbereiche, vor allem vor Namibia und Peru. Würden hier Wolken gezüchtet, könnte diese Methode bis zu 35 Prozent der derzeitigen Treibhausgas-Wirkung des Kohlendioxids kompensieren. Die Lebensdauer der einzelnen Wolken beträgt nur Stunden bis wenige Tage. Über der Fläche der tropischen



Meeresgebiete müssten daher pro Sekunde rund um den Globus gut verteilt mit vielen Tausend Schiffen Seewasser versprüht werden.

### **Anwendungsreife und Forschungsbedarf**

Inwieweit diese Methode wirtschaftlich und umweltverträglich ist, muss noch weiter untersucht werden. Zudem benötigte man energiesparende Sprühtechnologien. Zu bedenken ist auch, dass dieses Verfahren nur dann sinnvoll ist, wenn die Anlagen und Schiffe mit regenerativ erzeugtem Strom betrieben werden. Grundsätzlich besteht die technische Herausforderung darin, die Salzwasser-Aerosole in die Höhe zu bringen, in der sich die Stratokumulus-Wolken bilden (mehrere hundert bis zu 2.000 Meter).

## **AUFLÖSUNG VON ZIRRUS-WOLKEN ÜBER DEN POLARGEBIETEN IM WINTER**

Statt den abkühlenden Effekt der Wolken zu vergrößern, ist es auch denkbar, den erwärmenden Effekt zu verringern, indem man das Auflösen von Wolken beeinflusst. So wird eine RM-Methode diskutiert, mit der Zirrus-Wolken, die in einer Höhe von 5.000 bis 13.000 Metern vorkommen, aufgelöst oder zumindest verändert werden. Zirrus-Wolken bestehen aus Eiskristallen, die sowohl die kurzwellige Sonnenstrahlung als auch die langwellige Wärmestrahlung reflektieren. Auf welche Weise die Wolken wirken, hängt von der Höhe, der geografischen Breite oder auch der Form ihrer Eiskristalle ab. In den meisten Fällen werfen sie die langwellige Wärmestrahlung zum Erdboden zurück. Zirrus-Wolken tragen mithin eher zur Erwärmung der Erde bei. Dieser Effekt ist während der Polarnacht besonders ausgeprägt, da hier der kühlende Einfluss durch die Reflektion der Sonnenstrahlung wegfällt. Würden die Zirrus-Wolken nun aufgelöst bzw. ausgedünnt oder die Eigenschaften der Eiskristalle verändert, wäre der Weg für die langwellige Wärmestrahlung ins All frei: Die Erde könnte mehr Wärme abgeben. Theoretisch könnte man dies erreichen, indem Eiskeime in die Atmosphäre eingesät würden. Diese künstlichen Eiskeime ließen größere Eiskristalle entstehen, die schneller herabfallen, wodurch sich die Wolken auflösen könnten.

### **Potenzial**

Derzeit kann kein Potenzial der Methode angegeben werden. Es ist möglich, dass sich die polaren Zirrus-Wolken gar nicht im gewünschten Sinne beeinflussen lassen und dass die Methode

daher überhaupt nicht wirksam ist. Im optimalen Falle berechnen einige Modelle eine mögliche globale Abkühlung von 1 Grad Celsius. Der grundsätzliche Vorteil der Auflösung von Zirrus-Wolken wäre, dass die Wärmestrahlung und nicht die Sonnenstrahlung beeinflusst wird. Insofern kann der Effekt der Treibhausgase eventuell besser kompensiert werden. Da durch die Veränderung oder Auflösung der Wolken die Strahlungsbilanz regional sehr unterschiedlich stark beeinflusst werden würde, erwarten Wissenschaftler, dass sich sowohl das Klima als auch der Wasserkreislauf in den betroffenen Regionen verändern könnten. Auch die meteorologischen Nebenwirkungen könnten groß sein und Einfluss auf das regionale Wetter haben.

### **Maßstab**

Wissenschaftler gehen davon aus, dass der Materialaufwand für die Verteilung der Eiskeime relativ gering wäre. Möglicherweise würde es reichen, die Partikel an geeigneten Orten mit Verkehrsflugzeugen auszubringen. Die benötigten Materialmengen lägen im Bereich von einigen Kilogramm pro Flug.

### **Anwendungsreife und Forschungsstand**

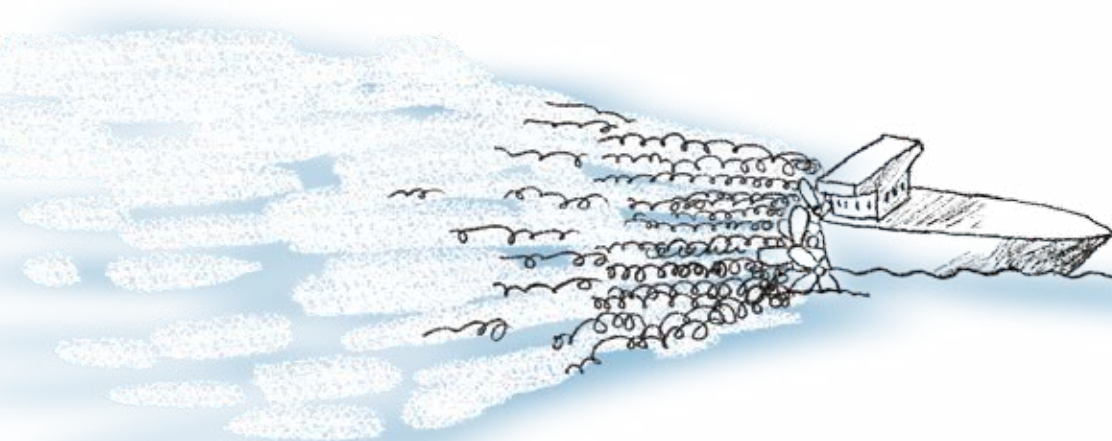
Weil Bildung und Eigenschaften der polaren Zirrus-Wolken noch nicht ausreichend erforscht sind, ist es unklar, wie gut sie sich in der Praxis tatsächlich auflösen ließen. Daher lässt sich die Wirkung dieser Methode bislang nicht exakt einschätzen.

## **STRAHLUNGSMANAGEMENT → VERÄNDERUNG DER ALBEDO**

In den letzten Jahren wurden auch Methoden diskutiert, mit denen man das Rückstrahlvermögen der Erde, die sogenannte Albedo, verstärken könnte. Das Ziel wäre, vermehrt kurzwellige Strahlung ins All zurückzuwerfen. Zu diesen Verfahren zählen:

### **ANBAU VON REFLEKTIERENDEN NUTZPFLANZEN**

Durch den Anbau von hellen Pflanzen lässt sich die Albedo von landwirtschaftlich genutzten Flächen erhöhen. Helle Getreidepflanzen etwa reflektieren das Sonnenlicht stärker als Pflanzen mit dunkelgrüner Blattfläche oder gar Wälder. Das Potenzial dieser Methode wird allerdings als gering eingeschätzt, weil



weltweit nicht genug Landfläche zur Verfügung steht, auf der man den Ackerbau nach RM-Gesichtspunkten ausrichten könnte. In den allermeisten Fällen muss die Landnutzung nach dem Nährstoffbedarf der Weltbevölkerung ausgerichtet werden.

### SCHAFFUNG REFLEKTIERENDER FLÄCHEN

Denkbar ist auch eine Erhöhung der Albedo von Städten oder Wüsten. Das Weißen von Hausdächern oder Straßen bringt wegen der geringen Flächen global aber nur wenig. Es kann höchstens das lokale Klima beeinflussen und Energiekosten sparen.

### MIKROBLÄSCHEN IM OZEAN

Bekannt ist, dass mikroskopisch kleine Luftblasen im Meer Sonnenlicht gut reflektieren. Solche Bläschen entstehen auf natürliche Weise durch Wellenschlag. Denkbar ist, Schiffe mit speziellen Belüftungsanlagen auszustatten, um größere Mengen an künstlichen Bläschen zu erzeugen. Man nimmt an, dass diese Bläschen eine Lebensdauer von Monaten bis Jahren haben. In der Summe könnte sich also ein messbarer Effekt ergeben. Bislang ist dieses Konzept aber nicht viel mehr als eine Idee. Machbarkeit und Auswirkungen auf die Umwelt müssten noch genauer untersucht werden.

### DAS GESAMTE BILD BETRACHTEN

Wenn CE-Methoden das Klima verändern sollen, müssen sie in einem sehr großen Maßstab durchgeführt werden. Dadurch könnten sie – unbeabsichtigt – andere Entwicklungsziele der Menschheit gefährden. Das gilt für Methoden der Kohlendioxid-Entnahme (CDR) ebenso wie für Methoden zum Strahlungsmanagement (RM). Die potenziellen Konfliktfelder können Wissenschaftler heute schon umreißen: Jeder Hektar, der mit dem Ziel des Klimaschutzes wiederaufgeforstet oder zu Biomasseplantagen umgewandelt wird, könnte langfristig

fehlen, wenn es darum geht, die stetig wachsende Weltbevölkerung zu ernähren. Futuristische Visionen wie die Bewaldung der Sahara scheitern unter anderem an der fehlenden Ressource Wasser. Die beschleunigte Verwitterung großer Mengen Gestein könnte die biologische Artenvielfalt der Flüsse und Küstengewässer gefährden.

Wie die Auswirkungen des Klimawandels sind auch die Nebenwirkungen von CDR- und RM-Methoden nicht einheitlich verteilt. Sie erzeugen Gewinner und Verlierer, indem sie bestimmte Bevölkerungsgruppen oder Staaten begünstigen bzw. benachteiligen. Um politischen Spannungen vorzubeugen, müssten grenzüberschreitende Nebenwirkungen also von Anfang an mitbedacht und Lösungen oder Kompensationsmaßnahmen vorgeschlagen werden. Hinzu kommt: Von jenem Zeitpunkt an, ab dem eine gezielte Beeinflussung des Klimas vorgenommen wird, besitzt jeder Hurrikan, jede Dürreperiode, jede Überschwemmung das Potenzial, zu politischen Verstimmungen zu führen, weil es schwierig sein wird, genau zu bestimmen, wer oder was das Wetterphänomen ausgelöst hat.

Als sicher gilt, dass sich mit RM-Methoden das ursprüngliche Klima, wie wir es heute kennen, nicht wiederherstellen lässt. Das liegt daran, dass Kohlendioxid und in die Atmosphäre eingebrachte reflektierende Partikel ganz unterschiedlich wirken. Kohlendioxid beeinflusst die Wärmeabstrahlung der Erde. Da Wärmestrahlung recht gleichmäßig vom Planeten abgestrahlt wird, ist dieser Effekt global relativ ähnlich. Eingebrachte reflektierende Partikel hingegen würden sich auf die einfallende Sonnenstrahlung auswirken, und diese ist weltweit sowohl räumlich als auch zeitlich sehr unterschiedlich. Sie wirkt am stärksten tagsüber in den Tropen. In Gebieten, in denen polarer Winter herrscht, tragen die Partikel hingegen gar nicht zur Änderung der Strahlungsbilanz bei. Auch der Einfluss auf den Regen und die Niederschlagsverteilung wäre sehr unterschiedlich. Insgesamt dürften sich die Vor- und Nachteile des RM ungleich auf die verschiedenen Regionen der Erde verteilen, was zu erheblichen politischen Spannungen und finanziellen Kompensationsforderungen führen könnte. Methoden zum Strahlungsmanagement bergen außerdem das Risiko des



sogenannten Terminationsschocks. Demnach könnte man zwar die Erwärmung der Welt zum Beispiel durch das Ausbringen von Schwefelpartikeln in der Hochatmosphäre für eine Zeit lang begrenzen – sollte man aber eines Tages damit aufhören, verschwindet der kühlende Effekt mit dem Absinken der Schwefelpartikel: Die Temperatur würde dann in einem viel schnelleren Tempo steigen, als dies ohne Klima-Beeinflussung der Fall gewesen wäre. Viele Tier- und Pflanzenarten hätten bei Eintreten einer abrupten Erwärmung vermutlich große Schwierigkeiten, sich den neuen Lebensbedingungen anzupassen.

Grundsätzlich lassen sich die Folgen der RM-Methoden, aber auch vieler CDR-Methoden – sofern im großen Maßstab angewandt – derzeit kaum abschätzen. Die Grenzen des Climate Engineerings sind aber nicht nur natürlicher oder technischer Art, sondern auch politischer Natur. Die Verwaltung und Steuerung des Climate Engineerings ist eine ungelöste Herausforderung.

### Eine Fülle an Methoden – doch welche wäre geeignet?

Die Aufzählung verschiedener CDR- und RM-Methoden macht deutlich, dass es eine Fülle an Ideen gibt, die in der Zukunft potenziell als Ergänzung zur Emissionsminderung anwendbar wären. Während einige Methoden, wie etwa die Aufforstung oder die Produktion von Pflanzenkohle, bereits technisch ausgereift sind, sind andere bloße Ideen. Als sicher gilt, dass man nicht nur auf eine einzige Methode setzen, sondern je nach den Bedingungen vor Ort und je nach dem Zustand des Klimas verschiedene Methoden nutzen würde und müsste. Dabei ist zu beachten, dass viele CDR-Methoden über die Änderung der Albedo und des Wasserkreislaufs auch direkt in den Strahlungshaushalt eingreifen und dass umgekehrt viele RM-Methoden insbesondere über Temperatureffekte auf biologische Prozesse auch zu Veränderungen im Kohlenstoffkreislauf führen. Eine klare Trennung der jeweiligen Effekte und Nebenwirkungen gleichzeitig angewandter CDR- und RM-Methoden wäre also nicht immer möglich.

Beim Einsatz eines Portfolios von verschiedenen CE-Methoden käme hinzu, dass sich einzelne Methoden in ihren Wirkungen überlagern könnten. Die Situation wäre dann im Grunde vergleichbar mit einem Patienten, der zur Bekämpfung einer Krankheit viele verschiedene Medikamente einnimmt, von denen man aber weder genau weiß, wie sie individuell beim

Patienten wirken, noch wie sie es im Zusammenspiel mit anderen Medikamenten tun. Wie groß die Wechselwirkungen sind bzw. wie man sie idealerweise nutzt, ist noch nicht ausreichend untersucht. Es könnte schwierig sein, Effektivität und Nebenwirkungen auf einzelne Methoden herunterzubrechen und den Einsatz dementsprechend zu regulieren. Eine internationale Abstimmung über den Einsatz der Methoden und ein koordiniertes Vorgehen wären daher grundlegende Voraussetzungen.

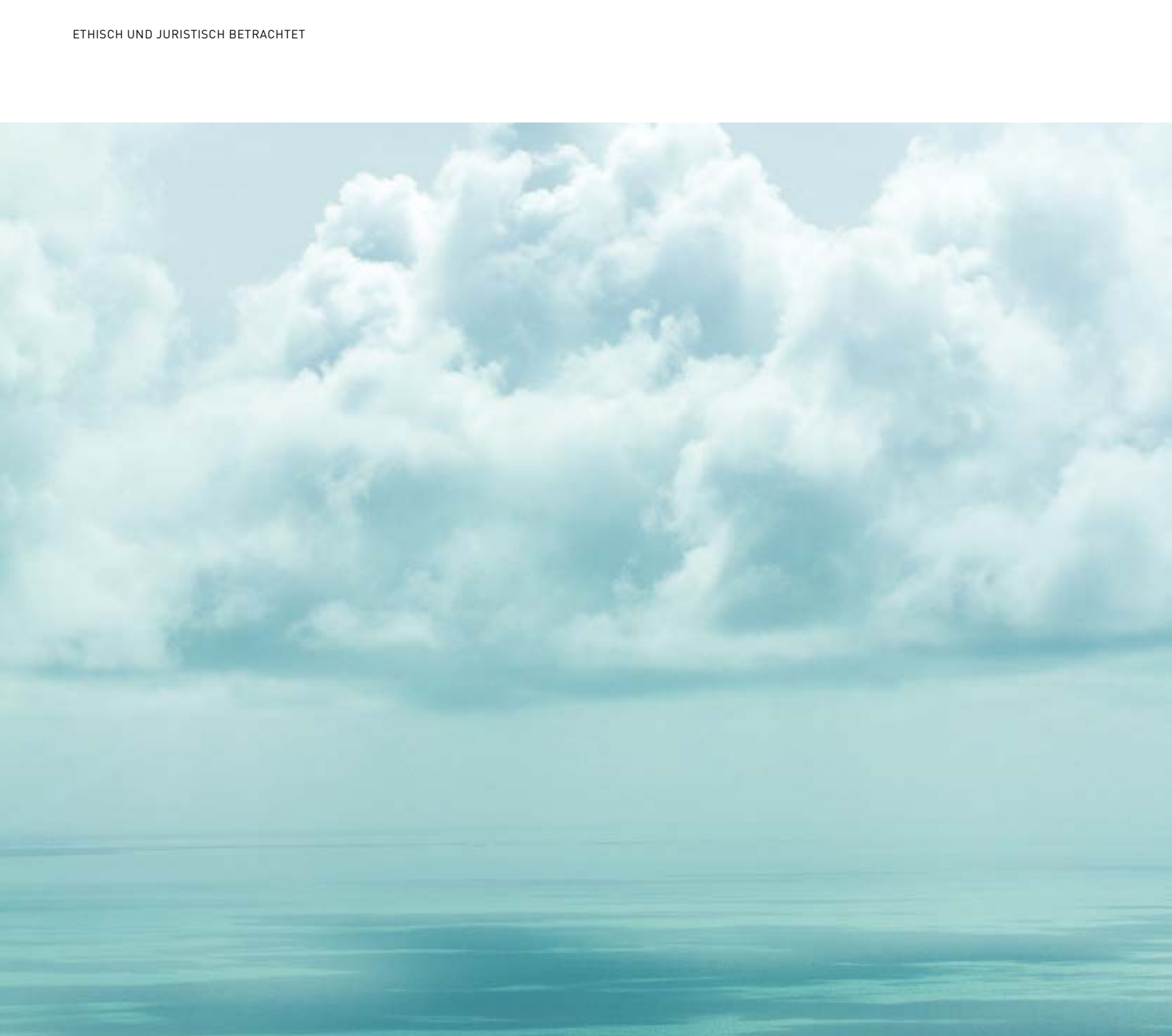
Ob CDR- oder RM-Methoden als Ergänzung zur Emissionsminderung zum Einsatz kommen, wird letztlich von politischen Entscheidungen und gesellschaftlichen Werten abhängen. Der Einsatz von Climate Engineering ist eben nicht nur eine Frage der technischen Machbarkeit. Vielmehr werden auch grundlegende gesellschaftliche Fragen wie etwa die der Generationengerechtigkeit berührt. ♦

#### KOMPAKT

- CDR-Methoden tragen dazu bei, die Ursache der Erderwärmung zu bekämpfen, indem das Kohlendioxid aus der Erdatmosphäre entfernt wird. RM-Maßnahmen hingegen bekämpfen lediglich das Symptom der Erderwärmung.
- CDR- und RM-Methoden sind nur dann klimarelevant, wenn sie in großen Dimensionen zur Anwendung kommen. Auf großer Skala birgt jede der Methoden jedoch bestimmte Risiken.
- Keine der CDR- oder RM-Methoden ist bislang so weit ausgereift, dass sie sich im großtechnischen Maßstab einsetzen ließe. Viele Methoden sind bislang rein theoretische Überlegungen, die bestenfalls in kleinen Feldexperimenten getestet wurden.

#### WEITERLESEN

- Ethisch und juristisch betrachtet: Haben wir das Recht oder sogar die Pflicht, das Klima gezielt zu beeinflussen? – S. 42
- Kontrolle nur begrenzt möglich: Die Krux des chaotischen Klimasystems – S. 54



Wer die Erdtemperatur großtechnisch beeinflussen will, greift in Energie- und Stoffkreisläufe des Planeten ein und beeinflusst das gesellschaftlich-politische Gefüge auf schwer vorhersagbare Weise. Damit stellt sich die Frage: Dürfen wir Menschen Climate Engineering einsetzen, oder sind wir angesichts der für viele Menschen und Ökosysteme bedrohlichen Erderwärmung womöglich sogar dazu verpflichtet?

## ETHISCH UND JURISTISCH BETRACHTET:

# HABEN WIR DAS RECHT ODER SOGAR DIE PFLICHT, DAS KLIMA GEZIELT ZU BEEINFLUSSEN?

Welche Argumente sprechen dafür oder dagegen, bestimmte Methoden zu erforschen, zu erproben und einzusetzen? Die technische Machbarkeit allein reicht für Antworten auf diese Fragen nicht aus. Können impliziert kein Dürfen. Ethiker befassen sich daher mit der moralischen Begründung und Bewertung der Optionen und Maßnahmen. Sie rekonstruieren und analysieren Argumente für und wider. Rechtswissenschaftler wiederum überprüfen, ob sich potenzielle Maßnahmen mit geltenden völkerrechtlichen Bestimmungen und Prinzipien in Einklang bringen lassen.

Wichtig ist: Die ethischen und rechtlichen Argumente gelten für Methoden zur Kohlendioxid-Entnahme und Methoden des Strahlungsmanagements im unterschiedlichen Maße. Ausschlaggebend dafür ist, dass sich die verschiedenen Ansätze, die unter Climate Engineering zusammengefasst werden, substantiell in ihrer Intention, in den räumlichen und zeitlichen Skalen, in ihren Auswirkungen und in den mit ihnen verbundenen Risiken voneinander unterscheiden. Differenziert wird auch bei den moralischen und politischen Fragen, welche sich angesichts der unterschiedlichen Methoden stellen. Beim Thema Strahlungsmanagement müssen vielfach andere Themen diskutiert werden als bei den Methoden zur Kohlendioxid-Entnahme. Bei Letzterer wird nochmals stark zwischen ozean- und landbasierten Verfahren unterschieden. Das bedeutet, dass pauschale Urteile über die Zulässigkeit oder Unzulässigkeit von Climate Engineering als Ganzes nicht überzeugend sind und in der Diskussion nicht weiterführen. Es ist möglich, dass man sich für CDR-Methoden und gegen RM-Methoden (oder auch umgekehrt) oder gar nur für eine einzelne Methode innerhalb von CDR oder RM positionieren kann.

### Immer nur die zweitbeste Lösung

Eine typische Grundannahme, die Ethiker überprüfen, ist beispielsweise die in den 1960er- und 1970er-Jahren verbreitete Überzeugung, dass für Probleme, die politisch nicht gelöst werden können, eine schnelle und bestenfalls günstige technische Lösung (Techno-Fix) gefunden werden muss. Dieses Argument geht davon aus, dass man sich mit Technik jene Zeit kaufen könne (engl.: buying time), die für eine politische Lösung benötigt wird.

Übersetzt in den CE-Kontext heißt das: Weil eine umfassende Umstellung der Weltwirtschaft auf kohlendioxid-neutrale Energiequellen noch etliche Jahrzehnte dauern werde, müsse man Climate Engineering ernsthaft in Erwägung ziehen. Einer solchen Kombination aus „buying time“- und „Techno-Fix“-Argument stehen jedoch mehrere Argumente entgegen.

### Ein falsches Gefühl von Sicherheit

Ein in der Debatte besonders wichtiges Argument ist, dass durch die Forschung und Entwicklung von CE-Methoden die mit einem Anstieg der Treibhausgas-Emissionen verbundenen Risiken verstärkt ignoriert werden könnten (engl.: moral hazard). Diesem Denkansatz zufolge könnten sich Menschen aufgrund der theoretischen Machbarkeit von Climate Engineering in Sicherheit wiegen. Insbesondere mit RM-Methoden als vermeintlichem „Ass im Ärmel“ verschlossen sie die Augen vor den Gefahren des Klimawandels. Mit der

**Ist es moralisch vertretbar, unseren energieintensiven Lebensstil beizubehalten und seine Nebenwirkungen auf die kommenden Generationen abzuwälzen? Können wir angesichts des Konfliktpotenzials mit Methoden des Climate Engineerings als Ergänzung zur Emissionsminderung rechnen?**

## Welche Argumente sprechen dafür oder dagegen, bestimmte Methoden zu erforschen, zu erproben und einzusetzen? Die technische Machbarkeit allein reicht für Antworten auf diese Fragen nicht aus.

Hoffnung, dass sich hierdurch das Schlimmste verhindern ließe, nähme die ohnehin geringe Bereitschaft der Menschen ab, ihre Lebensweise zu ändern und den Wandel zu einer kohlenstoffarmen Wirtschaft zu unterstützen.

Mit dieser Einstellung würde die Menschheit jedoch die Risiken, welche mit den einzelnen Methoden verbundenen sind, in die Zukunft verschieben und ihre Verantwortung für kommende Generationen außer Acht lassen. Wäre ein solches Ignorieren und Weitergeben des Risikos vertretbar? Legt man den Maßstab der intergenerationellen Gerechtigkeit an, dann müssen wir unseren Enkeln und Urenkeln eine Welt hinterlassen, in der sie keine schlechteren Möglichkeiten vorfinden als die heutigen Generationen. Das Gebot verpflichtet uns nämlich, die durchschnittlichen Lebensaussichten in der Zukunft zu verbessern und nicht zu verschlechtern.

Dieses Verschlechterungsverbot gilt besonders für die ärmeren Regionen des Planeten. Um dieser Verpflichtung nachzukommen, muss die Menschheit den Klimawandel ab sofort so strikt wie möglich begrenzen, Anpassungsstrategien entwickeln und finanzieren und der klima- und umweltbedingten Migration einer großen Zahl von Menschen vorbeugen. Nehmen wir die Generationenverantwortung ernst, sind wir auch verpflichtet zu verhindern, dass CE-Einsätze unsere Nachkommen vor das Dilemma stellen könnten, CE-Methoden trotz schwerwiegender Nebenfolgen fortzusetzen oder aber einstellen zu müssen und dadurch womöglich einen noch rascheren Klimawandel hervorzurufen. Diese Aussagen gelten besonders für RM-Methoden, weil das Strahlungsmanagement die Treibhausgas-Konzentration in der Atmosphäre nicht reduzieren würde. Mit diesen Methoden würde die Problemlösung ohne weitreichende flankierende Maßnahmen zur CO<sub>2</sub>-Reduktion in die Zukunft verschoben.

In Teilen gilt diese Risikobetrachtung aber auch für CDR-Methoden, denn auch diese gehen aufgrund ihres notwendigen Umfangs bei klimawirksamer Anwendung mit erheblichen Risiken einher. Solange die Menschheit nämlich weiterhin immer mehr Kohlendioxid in die Atmosphäre entlässt, bräuchte sie auch immer mehr Landflächen und Meeresgebiete, um diese Emissionen durch geeignete CDR-Methoden zu kompensieren.

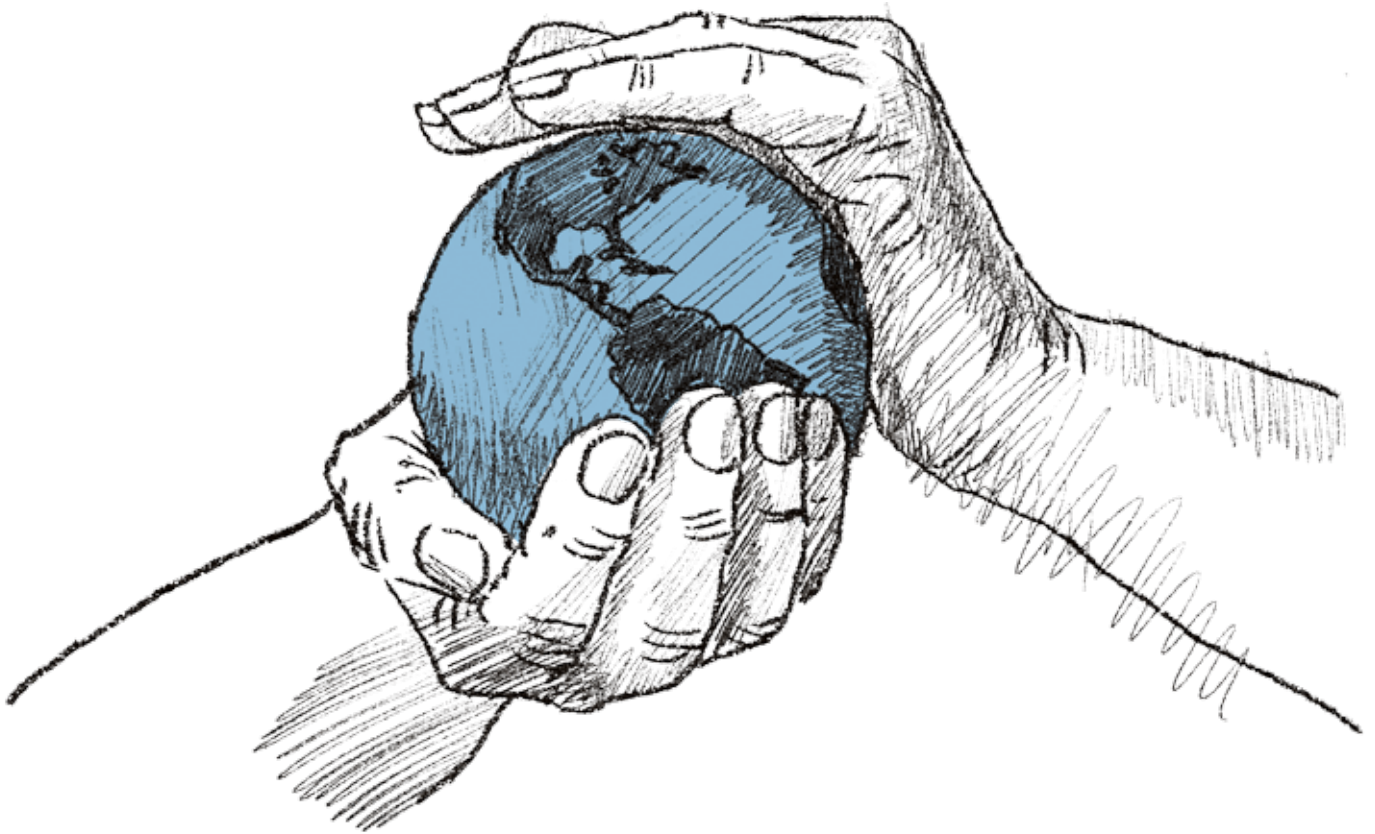
Für einige CDR-Methoden, insbesondere Aufforstung, müsste über sehr lange Zeiträume sichergestellt werden, dass der gespeicherte Kohlenstoff nicht irgendwann wieder freigesetzt wird. Angesichts der wachsenden Weltbevölkerung und der Notwendigkeit, die Nahrungserzeugung auszuweiten, könnten sich landintensive CDR-Strategien (z. B. die Erzeugung von Bioenergie gekoppelt mit CCS, BECCS) in Hinblick auf die Landnutzung als extrem konfliktträchtig herausstellen. Vielfach können Flächen, die für CDR-Methoden gebraucht werden, nicht mehr für die Nahrungsmittelproduktion genutzt werden. Auch wären die Auswirkungen von BECCS auf Bodenpreise, Landeigentum und damit auf die landwirtschaftliche Lebensgrundlage vieler Menschen mit zu bedenken. Zudem könnten sowohl Wasserreserven als auch Artenvielfalt zurückgehen, sollten riesige Plantagen schnellwachsender Gräser oder Gehölze angelegt werden. Allein die Frage der Bewässerung von BECCS-Pflanzen verdeutlicht zukünftige Ressourcenkonflikte, wenn man bedenkt, dass bereits heute circa 70 Prozent des Trinkwassers in die Bewässerung landwirtschaftlicher Flächen fließen.

Ist es moralisch vertretbar, unseren energieintensiven Lebensstil beizubehalten und seine Nebenwirkungen auf die kommenden Generationen abzuwälzen? Können wir angesichts des Konfliktpotenzials mit Methoden des Climate Engineerings als Ergänzung zur Emissionsminderung rechnen? Wenn wir Gerechtigkeit zwischen heutigen und künftigen Generationen in Hinblick auf das Weltklima und die Natur als Maßstab unseres Handelns verstehen, sind dies Fragen von großer Bedeutung.

### Die Gefahr der Selbstüberschätzung

Gegen großskalige Eingriffe in das Klima der Erde spricht die Tatsache, dass Menschen dazu neigen, die eigenen Fähigkeiten zu überschätzen. Das gilt auch für Forscher und Ingenieure. Das Argument der Selbstüberschätzung wird als Hybris-Argument bezeichnet. Der Begriff *hybris* stammt aus dem Altgriechischen und wird mit Übermut und Anmaßung übersetzt.

Selbst nach Jahren intensiver Forschung zu den verschiedenen Methoden des Climate Engineerings wäre es leichtfertig zu glauben, wir Menschen würden die Wirkungsweise dieser Methoden auf die zu beeinflussenden Systeme im vollen Umfang verstehen und beherrschen – zumal viele der Methoden technisch noch gar nicht realisiert sind und auch nicht ohne Weiteres im Freiland erprobt werden können. Dies betrifft insbesondere das Ausmaß ihrer beabsichtigten und



unbeabsichtigten Wirkungen, ihren Einfluss auf das politisch-soziale Gefüge und damit auch auf deren Kosten und Folgekosten. Es ist davon auszugehen, dass im Zuge des Einsatzes von CDR- wie RM-Methoden neue Problemfelder entstehen werden.

### Ein Abschied von der natürlichen Welt

Ein drittes Argument gegen Climate Engineering resultiert aus der Frage, inwiefern insbesondere Methoden zum Strahlungsmanagement unser Verhältnis zur Natur verändern würden. Bedeuten technische Eingriffe in das Klima den endgültigen Abschied vom natürlichen System Erde? Aus der Tatsache, dass wir das Weltklima unwillentlich durch die Nutzung fossiler Energie verändert haben, folgt jedenfalls nicht, dass wir es auch absichtsvoll beeinflussen dürfen. Die gezielte Steuerung der Klimaabläufe in die Hand zu nehmen, hieße, das Vertrauen in die Berechenbarkeit und Beherrschbarkeit von Eingriffen in das Erdgeschehen auf die Spitze zu treiben.

Als Ausdruck der totalen menschlichen Dominanz über die Natur werden bislang vor allem Methoden zum Strahlungsmanagement diskutiert. Maßnahmen wie die Wiederaufforstung von Wäldern stehen nicht notwendigerweise im starken Gegensatz zum Naturschutzgedanken, wonach Menschen die Natur respektieren und den eigenen Einfluss reduzieren sollten. Es wäre durchaus möglich, CDR-Strategien mit Strategien zur Anpassung des Naturhaushaltes an den Klimawandel, zum

Erhalt der Biodiversität und zur Renaturierung zu verbinden. Dies betrifft vor allem Wälder, Moore und Böden und wird in diesem Kontext auch als Natural Climate Solutions bezeichnet. Allerdings können großflächig angelegte renaturierende Maßnahmen ebenfalls große Eingriffe in Ökosysteme sein. Damit könnten auch sie in Konkurrenz mit anderen Nachhaltigkeitszielen wie der Nahrungsmittelproduktion stehen. Wenn die Speicherung relevanter Mengen von Kohlenstoff über lange Zeiten sichergestellt werden soll, werden auch naturnahe Maßnahmen in der Regel ein aktives Management – das heißt: ein Eingreifen in die Natur – erfordern.

### Die Frage nach den wichtigsten Zielen

Die Vereinten Nationen haben 17 Ziele formuliert, die eine nachhaltige Entwicklung auf der Welt sichern sollen – die Sustainable Development Goals (SDGs). Eines dieser Nachhaltigkeitsziele lautet, den Klimawandel einzudämmen. Es geht in der UN-Nachhaltigkeitsstrategie aber auch um Armutsbekämpfung, Ernährungssicherheit, Frieden, natürliche Ressourcen und um Wasserversorgung. Die Umsetzungsaufgabe ist komplex und die Herausforderung für die Menschheit groß. Angesichts der Komplexität ist es offensichtlich, dass jede CE-Methode das Potenzial besitzt, in Konflikt mit diesen UN-Nachhaltigkeitszielen zu geraten. Dies gilt insbesondere für Wasserreserven, Artenvielfalt und Ernährungssicherheit. Aber auch positive Effekte sind möglich – beispielsweise die Verbesserung der Bodenfruchtbarkeit durch die Anreicherung von



Ackerböden mit Gesteinspulver (beschleunigte Verwitterung). CDR-Methoden, die positive Wechselwirkungen mit anderen SDGs realistischerweise erwarten lassen, verdienen daher besondere wissenschaftliche und politische Aufmerksamkeit.

Im Falle eines Einsatzes von CDR- oder RM-Methoden sind je nach Methode Situationen denkbar, in denen Ziele gegeneinander abgewogen werden müssten. Ein Beispiel wären auch hier landbasierte CDR-Methoden wie der Anbau von Pflanzen zur Bioenergie- oder Pflanzenkohlegewinnung: Ihr großflächiger Einsatz könnte den Schutz der Artenvielfalt sowie eine ausreichende Lebensmittelproduktion gefährden. Wie solche Konflikte gelöst werden könnten, wird kontrovers diskutiert. Entscheidend wird am Ende sein, welche Prioritäten gesetzt werden, wer profitieren soll oder darf und wer nicht. Diese Fragen wiederum sind Wertefragen und damit ein grundlegendes ethisches Thema. Eine politische Antwort darauf sollte nur auf Basis ausreichender ethischer Argumente erfolgen. Einen simplen Algorithmus für die Lösung der Zielkonflikte wird es kaum geben. Umso wichtiger sind übergeordnete politische Strukturen der Entscheidungsfindung.

### Wie überzeugend sind die ethischen Argumente für Climate Engineering?

Trotz dieser kritischen Argumente gegen CDR- und RM-Methoden gibt es auch Aspekte, die für eine Erforschung und einen möglichen Einsatz der Methoden sprechen. Die zentralen Argumente sind – in einfachen Worten zusammengefasst – folgende:

#### → das Argument der Generationenverantwortung

Die Folgen des Klimawandels werden vor allem die kommenden Generationen treffen. Aus diesem Grund müssen wir unsere Nachkommen mit Kenntnissen über CDR- und RM-Methoden ausstatten, sodass sie eines Tages eigenständig über deren Einsatz entscheiden können. – Man bezeichnet dieses Argument auch als „arming the future“-Argument.

#### → das Argument der Notfallregulierung

Wir brauchen klimaregulierende Methoden, um in Notfallsituationen schnell und wirksam in das Klima eingreifen zu können. – Dieses Argument wird als „emergency“-Argument bezeichnet und gilt nur für RM.

### → das „buying time“-Argument

Durch den zeitlich begrenzten und dosierten Einsatz von RM-Methoden kann die Menschheit Zeit gewinnen, die Treibhausgas-Konzentration in der Atmosphäre durch CDR im großen Stil umfassend zu reduzieren, ohne dass es währenddessen zu einer weiteren Erwärmung kommt.

### → das Argument des kleineren Übels

Sollte es der Menschheit nicht gelingen, die Treibhausgas-Emissionen schnell genug zu verringern, wären die Übel eines CDR- oder RM-Einsatzes geringer als die eines Nicht-Einsatzes. – Dieses Argument ist auch als „lesser-evil“-Argument bekannt.

### Keine RM-Forschung ohne Investitionen in Emissionsvermeidung

Können die oben angeführten Argumente überzeugen? Richtig ist, dass mit jeder Tonne Kohlendioxid, die heute freigesetzt wird, der Handlungsdruck auf künftige Generationen steigt. Denn sie müssen in noch kürzerer Zeit mehr Kohlendioxid aus der Atmosphäre entfernen, wenn die Erderwärmung bis zum Ende des 21. Jahrhunderts auf unter 2 Grad Celsius begrenzt werden soll. Die Anforderungskurve wird also umso steiler, je länger wirksame Klimaschutzmaßnahmen hinausgezögert werden.

Die wohlmögliche Not kommender Generationen als Argument zu nutzen, heute schon RM-Methoden zu entwickeln, anstatt entschlossen Maßnahmen zur Emissionsminderung

## EXKURS

### CLIMATE ENGINEERING AUF PROBE: WIE LIESSEN SICH KÜNFTIG FELDEXPERIMENTE DURCHFÜHREN?

Welches Potenzial die verschiedenen CE-Methoden haben und welche Risiken ihr Einsatz mit sich bringt, lässt sich auf drei verschiedenen Wegen abschätzen: durch Computersimulationen mit mathematischen Modellen des Klimasystems, durch Experimente im Labor und durch Feldexperimente. Generell liegt ein Vorteil von Feldexperimenten darin, dass Versuche unter realen Bedingungen durchgeführt werden und oftmals Ergebnisse liefern, die sich am Computer und im Labor nicht gewinnen lassen.

Um die globalen Effekte und Nebeneffekte einer Methode verlässlich beurteilen zu können, müssten Feldexperimente auf großer Skala durchgeführt werden. Soll beispielsweise untersucht werden, wie sich die Strahlungsbilanz der Erde durch das Ausbringen von Wassertröpfchen in der Atmosphäre verändert, muss sehr viel Wasser in die Atmosphäre gebracht werden. Selbst wenn das Feldexperiment auf dem Hoheitsgebiet eines einzelnen Staats durchgeführt werden würde, könnten sich die eingebrachten Wassertröpfchen durch Strömungen in der Atmosphäre schnell über große Distanzen, Regionen und Län-

dergrenzen hinweg verteilen. Die Dimension eines Feldexperiments könnte also in manchen Fällen einem regulären Einsatz nahekommen.

In der Vergangenheit gab es einige wenige Bestrebungen für kleinskalige wissenschaftliche Feldexperimente – sowohl für RM- als auch für CDR-Methoden. Ein Beispiel ist das deutsche LOHAFEX-Projekt (ein Kunstwort aus dem indischen Begriff für Eisen Loha und der Abkürzung FEX für fertilization experiment, Düngungsexperiment), bei dem im Jahr 2009 von einem deutschen Forschungsschiff mehrere Tonnen Eisensulfat im Südatlantik ausgebracht wurden, um eine künstliche Algenblüte anzuregen. Umweltschützer reagierten empört und befürchteten, dass Meerespflanzen und -tiere durch die Algenblüte negativ beeinflusst werden könnten. Das Bundesforschungsministerium musste schließlich – insbesondere auf Druck des Bundesumweltministeriums – eine erneute, unabhängige Überprüfung des Experiments durchführen lassen, während das Schiff schon auf dem Weg in das Untersuchungsgebiet war. Laut Gutachten war das Vorhaben aus Umweltsichtspunkten unbedenklich und stand im Einklang mit den völkerrechtlichen Vorgaben. Das Experiment konnte fortgesetzt werden.

umzusetzen, bezeichnen einige Experten – auch angesichts der genannten Gefahr eines moral hazard – als unredlich. Wer nicht bereit sei, seinen eigenen Lebensstil den Klimazielen anzupassen, der dürfe auch nicht mit dem Argument der Zukunftssicherung in die Erforschung und -Entwicklung von RM-Methoden investieren. Diese Auffassung bezeichnet man auch als Konditionalitätsargument. Einem Staat sollte also nur dann der Einstieg in RM-Forschung und -Entwicklung erlaubt sein, wenn er bestimmte klimapolitische Bedingungen erfüllt. Diese Bedingungen beziehen sich auf die klimapolitische Integrität und die Vertrauenswürdigkeit eines Staates. Welchen Akteuren kann man angesichts der genannten Risiken und der Neigung zur Hybris die RM-Methoden guten Gewissens anvertrauen, und wer entscheidet darüber? Einige Umwelthethikerinnen und -ethiker des DFG-Schwerpunktprogramms haben daraus ein RM-Forschungsprinzip entwickelt. Es besagt, dass Staaten nur dann Forschung zum Strahlungsmanagement betreiben dürfen, wenn sie eine ambitionierte Klimapolitik

**Entscheidend wird am Ende sein, welche Prioritäten gesetzt werden, wer profitieren soll oder darf und wer nicht. Diese Fragen wiederum sind Wertefragen und damit ein grundlegend ethisches Thema.**

betreiben und angemessene Beiträge in internationale Klimaausgleichsfonds einzahlen. Dieses Konditionalitätsargument bezieht sich vor allem auf Freilandforschungen auf unterschiedlichen Skalen. Laborforschungen und Modellberechnungen fallen dagegen unter das Prinzip der Forschungsfreiheit.

#### Notfallszenario: ein Spiel mit dem Feuer

Argumente, die sich für den Einsatz klimaregulierender RM-Methoden in Notfallsituationen aussprechen, sind ebenfalls kritisch zu hinterfragen. Die entscheidende Frage hierbei

Ein anderes Beispiel ist das Experiment SCOPEX (Stratospheric Perturbation Experiment, Stratosphärisches Störungsexperiment), welches eine Forschergruppe von der Harvard University plant. Bei diesem Feldexperiment sollen mit einem Ballon etwa ein Kilogramm künstliche Aerosole in 20 Kilometer Höhe ausgebracht werden. Dabei würde sich eine Partikelwolke bilden, die der Ballon durchfliegen soll, um wissenschaftliche Messungen vorzunehmen. Diese gäben Aufschluss über das physikalisch-chemische Verhalten der Aerosole und damit über Effekte und Nebeneffekte der Methode. Wann das Experiment stattfinden wird und ob sich auf dieser kleinen Skala überhaupt ein Effekt messen lässt, ist derzeit noch offen. Aktuell sind auch CDR-Feldexperimente in Planung, die privatwirtschaftlich finanziert werden. Vor der chilenischen Küste soll beispielsweise ein Eisendüngungsexperiment durchgeführt werden. Dieses soll aber vor allem zeigen, inwieweit sich durch das verstärkte Algenwachstum die Fischerei-Erträge erhöhen lassen. In einem anderen Projekt vor der chinesischen Küste soll durch starke Pumpen nährstoffreiches Tiefenwasser an die Meeresoberfläche gefördert werden, um das Algenwachstum anzuregen.

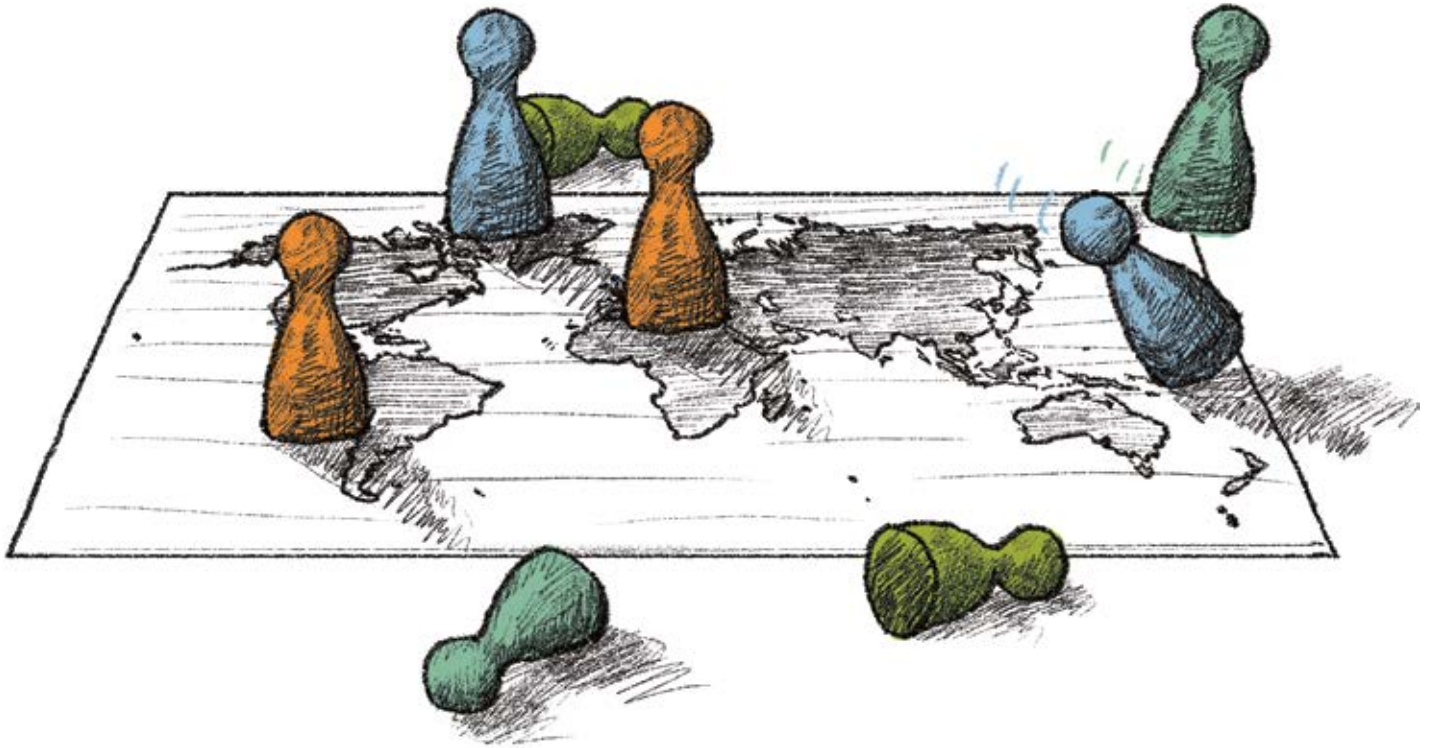
Obwohl also bereits RM- und CDR-Experimente durchgeführt wurden und andere angedacht sind, werden sie international nicht reguliert. Feldexperimente unterliegen nur den jeweiligen

nationalen Bestimmungen. Wie bei einem möglichen großskaligen Einsatz von CE-Methoden sind aber auch für Feldexperimente steuernde Instrumente und Regeln zwingend erforderlich, weil nicht auszuschließen ist, dass andere Regionen durch die Experimente Schaden nehmen könnten (siehe Kap. 5).

Generell braucht es Regeln, die Staaten dazu verpflichten, transparent zu sein, einen allgemeinen Zugriff auf die Daten des Experiments zu erlauben und die Ergebnisse vor allem auch dann zu veröffentlichen, wenn das Experiment negative bzw. unerwünschte Resultate hervorgebracht hat. 2017 hat ein internationales Wissenschaftlerteam der Universität Calgary einen *Verhaltenskodex für verantwortungsbewusste Geo-Engineering-Forschung* veröffentlicht. In diesem Kodex werden auch Vorschläge zu Regeln für die Durchführung von Feldexperimenten gemacht, wie zum Beispiel verpflichtende Analysen der Umweltauswirkungen und Abschätzungen eventueller gesellschaftlicher Folgen vor Beginn des Experiments. Um eine sachliche Basis für konstruktive, öffentlich geführte Debatten zu CE-Experimenten zu schaffen, fordert der Verhaltenskodex ferner, die Bevölkerung zu einem Zeitpunkt umfassend zu informieren und zu beteiligen, an dem noch alle Optionen offen sind.







lautet: Was überhaupt ist ein Klima-Notfall? Dieser existiert ja nicht einfach, sondern muss ausgerufen werden. Als Beispiele werden häufig die sogenannten Kippunkte (engl.: tipping points) des Klimasystems angeführt. Gemeint sind weitreichende Veränderungen des Klimas, in deren Zuge sich die Lebensbedingungen für Abermillionen Menschen verschlechtern würden. Dazu zählen unter anderem das Abschmelzen des Westantarktischen Eisschildes, eine Abschwächung der Wassermassen-Umwälzung im Nordatlantik sowie das Ausbleiben des Monsunregens in Westafrika.

Zwar scheint es so zu sein, dass durch Eingriffe in den Strahlungshaushalt der Erde der Anstieg der globalen Durchschnittstemperatur zumindest für die Dauer des RM-Einsatzes verringert werden könnte. Fraglich bleibt allerdings, ob es mithilfe des Strahlungsmanagements gelingen würde, das Überschreiten einiger der diskutierten Kippunkte zu verhindern. Zum einen sind die Veränderungen vermutlich bereits im vollen Gang, bevor wir Menschen die ersten eindeutigen Anzeichen eines Kippunktes überhaupt wahrnehmen. Zum anderen würden aufgrund der Trägheit der betroffenen Prozesse auch drastische Maßnahmen unter Umständen keinen relevanten Einfluss mehr ausüben. Ein Überschreiten des Kippunktes könnte zu diesem Zeitpunkt kaum mehr verhindert werden. In anderen Fällen könnte die Verlangsamung des Temperaturanstiegs jedoch dazu führen, gefährliche Rückkopplungsprozesse

abzuschwächen. Eine schnelle Abkühlung der Erde könnte beispielsweise das Tauen des arktischen Dauerfrostbodens aufhalten und auf diese Weise verhindern, dass große Mengen des im Boden gespeicherten Methans austreten.

Es wäre auf jeden Fall naiv zu glauben, dass eine Notstandsdebatte im Zusammenhang mit drastischen Klimaveränderungen und Kippunkten allein auf Basis wissenschaftlicher Fakten geführt werden könnte. Ausnahme- oder Notstandssituationen müssen stets als solche politisch deklariert werden. Ein solches Vorgehen setzt voraus, dass sich eine Gesellschaft einig ist, unter welchen Voraussetzungen ein Notstand erklärt werden darf. Genügt ein rasanter Anstieg des Meeresspiegels oder jahrelange Trockenheit in bestimmten Regionen, um den Klima-Notstand auszurufen, oder bedarf es zusätzlich politischer und sozialer Unruhen? Wann also ist ein Ereignis so schlimm, dass es als Notfall gedeutet werden muss, aufgrund dessen der Einsatz von Methoden des Strahlungsmanagements legitim ist? Hätten beispielsweise die vom Hurrikan Katrina verursachten Überschwemmungen in New Orleans genügt, den planetaren Klima-Notstand auszurufen?

In Wirklichkeit spielen bei der Bewertung außergewöhnlicher Situationen immer auch unterschiedliche Wertvorstellungen, Wahrnehmungen und Interessen eine Rolle. Die Entscheidung über einen Ausnahmezustand – egal ob klimabezogen oder

nicht – ist immer ein politischer Akt, im Zuge dessen auch politische Interessen verfolgt werden. Besonders bedenklich ist der Umstand, dass Notstandssituationen demokratische Prinzipien außer Kraft setzen können. Auf diese Weise verleihen sie einigen Menschen Macht und Handlungsoptionen, die es ohne Ausnahmezustand nicht gäbe oder die unter normalen Umständen unrechtmäßig wären. Schon aus diesem Grund warnen Philosophen, Umweltethiker und Sozialwissenschaftler davor, das Argument der Notfallregulierung in der CE-Debatte unkritisch zu übernehmen.

### Strahlungsmanagement als möglicher Weg, Zeit zu gewinnen – unter drei Bedingungen

Trotz alledem weckt die Vorstellung, die Temperatur schnell und wirksam durch Strahlungsmanagement reduzieren zu können, auch Hoffnung. Die Menschheit könnte auf diese Weise Zeit gewinnen, die dringend gebraucht wird, um Technologien für ein emissionsneutrales Leben zu entwickeln, Klimaschutzmaßnahmen umzusetzen und ausreichend Kohlendioxid aus der Atmosphäre zu entfernen. Dieser Denkansatz ist aus Sicht einiger Wissenschaftler das einzige überzeugende Argument für einen Einsatz von RM-Methoden, wobei jede Form der Anwendung an drei Bedingungen geknüpft wäre.

→ Erstens bräuchte es eine klare Einsatzstrategie, die auf Basis umfangreicher wissenschaftlicher Erkenntnisse erstellt werden müsste. Da diese Forschungsergebnisse bislang aber noch fehlen, müsste in den kommenden Jahrzehnten viel geforscht und getestet werden, bevor die Menschheit tatsächlich großflächig in den Strahlungshaushalt der Erde eingreifen dürfte. Man müsste zeitnah von kleinskaligen Experimenten zu Testversuchen im großen Maßstab übergehen, wobei die Grenze zwischen Experiment und Testversuch fließend wäre. Zweitens müsste im Sinne des Konditionalitätsargumentes ein solcher Einsatz von großen Investitionen in Emissionseinsparungen und in ökologisch vertretbare CDR-Maßnahmen begleitet werden, um nicht nur die Symptome der Erderwärmung zu bekämpfen, sondern auch deren Ursache.

→ Drittens müsste der Einsatz im Sinne generationsübergreifender Gerechtigkeit von Anfang an zeitlich begrenzt sein. Die Initiatoren der Strahlungsmanagementmaßnahmen bräuchten demzufolge eine klare Ausstiegsstrategie, deren Umsetzung kontrolliert werden müsste. Der Ausstieg dürfte nicht abrupt, sondern müsste kontinuierlich erfolgen. Das „buying time“-Argument setzt also ein großes moralisches und politisches Vertrauen in jene Akteure voraus, die diesen Weg beschreiten.

Zusammenfassend lässt sich an dieser Stelle sagen, dass zwei fundamentale Einsichten bei allen Überlegungen zu Climate Engineering beachtet werden sollten: Erstens kann und darf der Einsatz von CE-Methoden kein Ersatz für die drastische Drosselung der Treibhausgas-Emissionen sein. Der Grundsatz muss sein, dass die Ursachen für Probleme behoben werden müssen. Zweitens wird das Verschieben von Risiken in die Zukunft durch den Einsatz von CE-Methoden nicht beendet. Im Gegenteil: Unter bestimmten Umständen kann der CE-Einsatz die Risiken für kommende Generationen sogar noch vergrößern. Diese Einsichten gelten im Prinzip für CDR-Methoden mit nicht-permanenten CO<sub>2</sub>-Speichern und RM-Methoden gleichermaßen. Unterschiedlich sind und bleiben die spezifischen Risikoprofile der verschiedenen CDR- und RM-Methoden. Eine drastische Reduktion der Emissionen in Verbindung mit renaturierenden Methoden und großzügigen Anpassungshilfen, die den Zielen der SDGs förderlich sind, könnte ein risikoärmeres Zukunftsszenario ergeben. Dieses würde es aus (umwelt-)ethischer Sicht verdienen, in Wissenschaft und Politik mehr beachtet und prioritär im Hinblick auf Potenzial und Nebenwirkungen untersucht zu werden.

**Ob bestimmte CE-Methoden zulässig sind oder nicht, wird für jede Methode einzeln auf Grundlage des einschlägigen Völkervertrags- und Völkergewohnheitsrechts beurteilt.**

## Sprechen rechtliche Argumente für oder gegen einen Einsatz von Climate Engineering?

Die grundsätzliche Frage, ob die Erforschung und der Einsatz von CE-Methoden rechtmäßig ist, ist auf Basis des Völkerrechts zu beurteilen, sofern sich die Folgen eines CE-Experiments oder -Einsatzes nicht auf das Staatsgebiet eines (ausführenden) Staates begrenzen ließen und Auswirkungen auch in den Nachbarstaaten oder darüber hinaus zu spüren wären.

Das Völkerrecht kennt bislang keine Normen, welche die Erforschung bzw. den Einsatz von Climate Engineering allgemein und umfassend regeln. Es gilt auch als unwahrscheinlich, dass sich die Staatengemeinschaft eines Tages auf einen umfassenden völkerrechtlichen Vertrag zum Climate Engineering einigen wird. Zu unterschiedlich sind die Interessen der Nationalstaaten und die Methoden von RM und CDR. Bislang gibt es nicht einmal eine völkerrechtlich verbindliche Definition von Climate Engineering. Ob bestimmte CE-Methoden zulässig sind oder nicht, wird stattdessen für jede Methode einzeln auf Grundlage des einschlägigen Völkervertrags- und Völkergewohnheitsrechts beurteilt.

Diese Einzelfallregelung hat zwei Vorteile: Erstens erfolgt die rechtliche Prüfung stets im Sachzusammenhang. Das heißt zum Beispiel, dass ein geplantes RM- oder CDR-Vorhaben immer auf Grundlage eines kontextbezogenen Spezialvertrags geprüft wird. Bei Projekten zur Eisendüngung der Meere wäre dies das *Protokoll zum Übereinkommen über die Verhütung der Meeresverschmutzung durch das Einbringen von Abfällen und anderen Stoffen* (London Protocol, siehe Kasten Seite 52). Im Falle von CE-Experimenten zur Wolkenbildung wären unter anderem Übereinkommen zur weiträumigen grenzüberschreitenden Luftverschmutzung sowie zum Schutz der Ozonschicht relevant. Der zweite Vorteil ist, dass die Staatengemeinschaft eher bereit ist, das bestehende Völkerrecht an neue Anforderungen anzupassen, wenn dies behutsam und Schritt für Schritt geschieht. Ohne eine große Mehrheit oder sogar Konsens unter den Nationalstaaten sind Änderungen ausgeschlossen.

Im Pariser Klimaabkommen verpflichten sich die Vertragsparteien dazu, mehr Kohlendioxid-Senken einzurichten und somit die Speicherkapazität für das Treibhausgas zu erhöhen. Verfahren zur Kohlendioxid-Entnahme wie Wiederaufforstung und Bioenergie-Gewinnung mit Kohlendioxid-Abscheidung und -speicherung (BECCS) werden zwar nicht explizit im Vertragswerk genannt, sind aber indirekt mit enthalten. Technologien des Strahlungsmanagements (RM) sind dagegen

ausgeschlossen, weil sie kein Kohlendioxid binden. Den Begriff Climate Engineering vermeiden die Autoren des Pariser Klimaabkommens.

Nach eingehender Analyse der einzelnen CE-Methoden kommen Rechtswissenschaftler zu dem Schluss, dass Maßnahmen zur Kohlendioxid-Entnahme tendenziell weniger rechtliche Bedenken hervorrufen als Maßnahmen zum Strahlungsmanagement. Für alle CE-Methoden gilt jedoch, dass im Falle eines Einsatzes der ausführende Staat zumindest dem Präventionsgrundsatz folgen (für das Vorsorgeprinzip ist dies noch immer umstritten) und gebührende Rücksicht auf bestehende Rechte und die territoriale Integrität anderer Staaten nehmen muss. Dazu gehört zum Beispiel auch die Durchführung einer Umweltverträglichkeitsprüfung, bevor über die Machbarkeit eines CE-Projekts entschieden werden kann. Sollte ein Staat allein, das heißt ohne Absprachen und ohne vorherige Prüfung, einen solchen CE-Einsatz planen und sollte dieser Auswirkungen auf Nachbarstaaten haben, wäre diese Maßnahme völkerrechtswidrig. Doch selbst wenn er alle Auflagen erfüllen würde, bliebe die finale Entscheidung eine Risikoabwägung. ♦

### KOMPAKT

- Pauschalurteile über die Zulässigkeit oder Unzulässigkeit von Climate Engineering als Ganzes sind aus ethischer Perspektive nicht möglich. Der Grund ist, dass sich die Methoden derart voneinander unterscheiden, dass eine Bewertung immer nur für jede einzelne erfolgen kann.
- Staaten sollten nur dann Methoden des Strahlungsmanagements erforschen dürfen, wenn sie gleichzeitig in die Emissionsvermeidung investieren.
- Bislang gibt es keine international verbindliche Definition von Climate Engineering. Ob bestimmte CDR- oder RM-Methoden zulässig sind, wird stattdessen für jede Methode einzeln auf Grundlage des Völkervertrags- und Völkergewohnheitsrechts beurteilt.
- Methoden zur Kohlendioxid-Entnahme (CDR) rufen tendenziell weniger rechtliche Bedenken hervor als Methoden zum Strahlungsmanagement. Für alle möglichen Maßnahmen aber gilt: Wer CE einsetzt, muss dem Präventionsgrundsatz folgen und Rücksicht auf andere Staaten nehmen.

## CE-REGULIERUNGEN UNTER DEM DACH INTERNATIONALER ABKOMMEN

Juristen ziehen bei der Frage nach den rechtlichen Grenzen eines CE-Einsatzes vor allem drei internationale Konventionen zu Rate, die jeweils Teilaspekte abdecken. Dazu zählen:

- die Londoner Konvention (Übereinkommen über die Verhütung der Meeresverschmutzung durch das Einbringen von Abfällen und deren Stoffen) sowie deren Aktualisierung, das London Protocol, relevant für marine CDR-Methoden,
- die Biodiversitätskonvention (Convention on Biological Diversity, CBD), potenziell relevant sowohl für CDR- als auch RM-Methoden,
- das Wiener Übereinkommen zum Schutz der Ozonschicht (nur RM-Methoden) einschließlich seines Protokolls von Montreal über Stoffe, die zu einem Abbau der Ozonschicht führen.

### Das London Protocol als Modellfall

Die Londoner Konvention aus dem Jahr 1972 gehört zu den ersten völkerrechtlichen Verträgen, die den Meeresschutz international zur Pflicht gemacht haben, und wurde 1996 durch das London Protocol für diejenigen Staaten, die dem Protokoll zugestimmt haben, geändert. Beide wurden vor allem mit der Absicht entwickelt, das Einbringen von schädlichen Abfällen und anderen Stoffen in den Ozean zu regulieren. Da bei CDR-Methoden wie zum Beispiel der Eisendüngung ebenfalls Stoffe in das Meer eingebracht werden, kann die Konvention in diesem Fall greifen. Kritisiert wird, dass der Konvention nur knapp 90 Staaten beigetreten sind und das London Protocol sogar nur über 40 Vertragsparteien verfügt, beide somit keine universelle Gültigkeit haben. Dennoch gilt sie als Konvention, die weltweit verbindliche Maßstäbe zum Meeresschutz setzt. Das liegt unter anderem daran, dass die Londoner Konvention durch das UN-Seerechtsübereinkommen gestärkt wird, die weltweit von fast allen Nationen anerkannte Verfassung für die Meere. So erklärt das UN-Seerechtsübereinkommen die Standards der Londoner Konvention und potenziell auch die des Protokolls indirekt für alle Staaten als maßgeblich, also selbst für jene Staaten, die die Verträge nicht unterzeichnet haben.

Internationale Konventionen haben die Eigenart, dass Ergänzungen, konkrete Rechte und Pflichten der unterzeichnenden Staaten zu einem späteren Zeitpunkt erweitert und ergänzt werden können. Dadurch wird es möglich, Konventionen auf neue, zum Zeitpunkt der Vertragsaushandlung noch unbekannte Phänomene anzuwenden. Hier liegt auch der große Vorteil im Hinblick auf marine CDR-Methoden. Denn damit wurde es möglich, das London Protocol in den vergangenen Jahren schrittweise um den Aspekt des CDR zu erweitern. Zwar sind die Ergänzungen noch nicht in Kraft getreten, weil sie ihrerseits von den Vertragsparteien des London Protocol ratifiziert werden müssen, doch ein Anfang ist gemacht. So wurde sein Anwendungsbereich dahingehend erweitert, dass künftig Marine Geo Engineering (marines CDR) unter dem Schirm dieses Vertragswerks reguliert werden kann. Bislang wurde in die Liste der CDR-Maßnahmen lediglich die Eisendüngung aufgenommen; durch Beschluss der Vertragsstaaten kann der Geltungsbereich des Protokolls aber auf andere ins Meer gelangende Stoffe, etwa bei der beschleunigten Verwitterung, erweitert werden. Das Protokoll wurde somit zukunftsfähig gemacht. Nach Ansicht von Rechtswissenschaftlern steht deshalb fest, dass das London Protocol als Modell dafür dienen kann, wie sich völkerrechtliche Verträge so anpassen lassen, dass sich unter ihrem Dach CDR-Methoden international regulieren ließen. Diskutiert wird allerdings noch, wann der Eintrag von Stoffen durch CDR-Maßnahmen im Einzelnen dem Meeresschutz widerspricht. Insofern spielt eine Rolle, inwieweit das Einbringen die Lebensräume im Meer beeinflusst oder verändert – ein Aspekt, der jeweils vor Durchführung eines Experiments anhand eines Bewertungsrahmens zu untersuchen ist. Die Zulässigkeit einer CDR-Maßnahme unter dem Dach des London Protocol ist also immer eine Frage des Einzelfalls.

### Der Schutz der Artenvielfalt geht bislang vor

Naturgemäß bezieht sich das London Protocol nur auf Substanzen, die ins Meer eingebracht werden, und damit nur auf einen Teil der Maßnahmen im weltweiten CE-Portfolio. Insofern bedarf es weiterer Regelwerke. Ein Beispiel für ein solches internationales Regelwerk ist die Biodiversitätskonvention (Convention on Biological Diversity, CBD). Die CBD wurde mit dem Ziel ausgehandelt, die biologische Vielfalt zu erhalten. Sie trat im Jahr 1993 in Kraft. Gemäß CBD hat jeder

Staat die Pflicht, seine natürlichen Ressourcen nachhaltig zu nutzen und grenzüberschreitende Schäden zu verhindern. Mit 196 Vertragspartnern ist die CBD fast universell gültig. Die USA haben die CBD allerdings nicht ratifiziert, sind also nicht an ihre Bestimmungen gebunden.

Auf den CBD-Vertragsstaaten-Konferenzen in den Jahren 2010 und 2012 wurden einstimmige Entscheidungen zu Protokoll genommen, nach denen die CBD auch in Sachen Climate Engineering beachtet werden sollte. So heißt es dort unter anderem, dass „mangels wissenschaftsbasierter, globaler, transparenter und effektiver Kontroll- und Regulierungsmechanismen für Geo-Engineering und im Einklang mit dem vorsorgenden Ansatz [...] keine klimabezogenen Geo-Engineering-Aktivitäten durchgeführt werden, die Auswirkungen auf die biologische Vielfalt haben können, bis eine angemessene wissenschaftliche Grundlage für die Rechtfertigung solcher Aktivitäten besteht“. Rechtlich bindend sind diese Ausführungen aber nach überwiegender Ansicht nicht.

Im Gegensatz zum London Protocol ist die CBD nicht dazu bestimmt, bestimmte Aktivitäten zu regulieren. Ihre potenzielle Rolle bei der Regulierung von Climate Engineering besteht stattdessen darin, Kategorien und Verfahren zu identifizieren, mit denen die potenziellen Auswirkungen von Climate Engineering auf die Biodiversität überwacht und bewertet werden können. Problematisch ist, dass die in der CBD enthaltenen Pflichten eher weich formuliert sind. Insofern ist noch offen, inwieweit sie im CE-Kontext Schlagkraft entwickeln können. Allerdings haben sie durch die große Anzahl der Vertragspartner eine starke politische Signalwirkung.

### Die Herausforderung, Schäden nachzuweisen

Diskutiert wird aktuell ferner, wann und unter welchen Voraussetzungen bestimmte internationale Regelwerke überhaupt greifen. Das zeigt das Beispiel des Wiener Übereinkommens zum Schutz der Ozonschicht. Ihm zufolge sind die Vertragsstaaten dazu verpflichtet zu verhindern, dass Substanzen in die Natur freigesetzt werden, welche die Ozonschicht zerstören können. Die Vertragsparteien sind aber erst dann verpflichtet zu intervenieren, wenn klar erkennbar ist, dass eine bestimmte Stoffklasse oder ein bestimmtes Verfahren schädlich ist. Es braucht also stets einen kausalen Nachweis. Grundsätzlich

könnte das Wiener Übereinkommen bei der Freisetzung von Salzwassertröpfchen zur Wolkenbildung oder bei der Ausbringung von Partikeln in die Stratosphäre greifen, weil beide RM-Methoden zum Abbau der Ozonschicht beitragen könnten. Das Problem besteht aber darin, dass sich ein solcher Nachweis nur dann führen lässt, wenn entsprechende RM-Experimente im großen Stil durchgeführt werden würden.

Die genannten Beispiele zeigen, dass es heute bereits eine Reihe von Regelwerken gibt, mit denen sich CDR- und RM-Methoden zwischen den Vertragsstaaten organisieren und verwalten ließen. Letztlich sind diese Konventionen und Übereinkommen aber nur dann wirksam, wenn die Vertragsstaaten entsprechende Rechte und Pflichten in ihren nationalen Gesetzen verankern und diese auch durchsetzen. Auch eine effektive Regulierung der Methoden wäre nur unter diesen Umständen möglich.

Um weltweit an einem Strang ziehen zu können, ist es zudem essenziell, dass sich die Staaten über ihre CE-Maßnahmen abstimmen und dass sie über ihre Aktivitäten Bericht erstatten. Sollten künftig tatsächlich CE-Maßnahmen durchgeführt werden, dann braucht es ein weltweites Buchführungssystem, in dem über die einzelnen Maßnahmen in den verschiedenen Nationen und deren Beitrag zur Kohlendioxid- und Strahlungsbilanz Buch geführt wird – nicht zuletzt um zu ermitteln, ob das weltweit angestrebte Ziel einer Kohlendioxid-Reduktion insgesamt tatsächlich erreicht wird.

Dass eine solche internationale Abstimmung möglich sein kann, zeigt ein Beispiel aus einem anderen Sachzusammenhang: Die Internationale Atomenergie-Organisation in Wien ist eine wissenschaftlich-technische Organisation, die über die weltweiten Aktivitäten ihrer Mitgliedsstaaten informiert wird und die für die Überwachung und Weiterentwicklung von Sicherheitsstandards zuständig ist. Ob nach ihrem Vorbild ein allgemeines Buchführungs- und Überwachungssystem für das Climate Engineering etabliert werden könnte, ist jedoch offen. ♦

Ob Methoden des Climate Engineering im Falle eines Einsatzes wirklich ihre erhoffte Wirkung entfalten, kann derzeit niemand genau sagen. Ein Grund ist die komplexe Natur des Klimasystems. Ihretwegen wird es weder ein Klima auf Bestellung geben, noch wird man im Streitfall exakt beweisen können, welche CE-Methode zu welchen Folgen geführt hat.



## KONTROLLE NUR BEGRENZT MÖGLICH: DIE KRUX DES CHAOTISCHEN KLIMASYSTEMS

CE-Methoden zielen darauf ab, den vom Menschen verursachten Klimawandel zu bremsen oder sogar umzukehren. Die Maßnahmen müssten deshalb so tiefgreifend sein, dass grundlegende Veränderungen im Klimasystem der Erde stattfinden. Während CDR die Ursache der Erderwärmung angeht und der Erfolg direkt an den jeweiligen CO<sub>2</sub>-Speichern gemessen werden kann, müsste bei RM-Methoden die klimatische Wirkung nachgewiesen werden. Allerdings haben auch einige CDR-Methoden, zum Beispiel Aufforstung oder Kohlenstoffmanagement der Böden, direkte Auswirkungen auf die Albedo und den Wasserkreislauf und wirken damit anders auf das Klima als eine Reduktion von CO<sub>2</sub>-Emissionen. Die atmosphärische Strahlung wiederum interagiert mit den vielen anderen Komponenten des Klimasystems, dessen Innenleben nicht nur komplex, sondern auch chaotischer Natur ist, was eine Überwachung der Auswirkungen möglicher CE-Maßnahmen extrem erschwert.

Wissenschaftler sprechen an dieser Stelle vom Klimarauschen, von Klimaschwankungen oder der natürlichen Variabilität des Klimasystems. Sie ist auf drei Ursachen zurückzuführen:

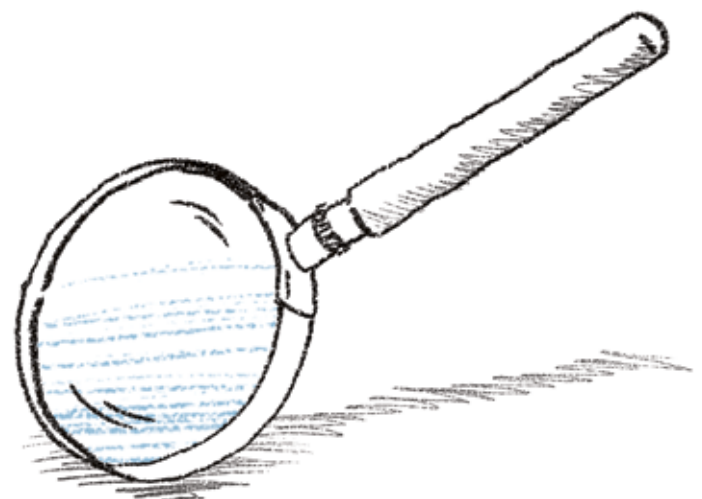
- Erstens beeinflussen externe Faktoren – wie die leicht schwankende Intensität der Sonneneinstrahlung oder aber die Menge der bei Vulkanausbrüchen in die Luft geschleuderten Staubpartikel – das Klima. Deren Einflüsse genau zu quantifizieren, stellt die Wissenschaft bislang noch vor große Herausforderungen.
- Zweitens reagieren die verschiedenen Komponenten des Klimasystems unterschiedlich schnell auf Veränderungen. Scheint beispielsweise die Sonne intensiver auf die Erde, zeigt die erhöhte Energiezufuhr im untersten Stockwerk der Erdatmosphäre schon nach wenigen Tagen oder Wochen Wirkung:

Die Lufttemperatur steigt. Bis die Erwärmung allerdings auch in den großen Tiefen der Ozeane nachgewiesen werden kann, vergehen Jahrzehnte, Jahrhunderte oder sogar Jahrtausende.

→ Drittens schwankt das Klima, weil seine Komponenten oft auf sehr unterschiedliche Weise miteinander interagieren. Manche reagieren schneller und auf direktem Wege; andere verändern sich zeitverzögert oder auf indirekte Weise. Das System ist deshalb niemals im Gleichgewicht und verändert sich in mehr oder weniger regelmäßigen Schwankungen, wie unter anderem der natürliche, aber dennoch nicht genau vorhersagbare Wechsel zwischen dem El Niño-Phänomen und dem La Niña-Zustand im tropischen Pazifik zeigt. Die regelmäßige Umkehr der Luft- und Meeresströmungen zwischen Australien und der Westküste Südamerikas hat Auswirkungen auf das Klima weltweit. Welche Rolle aber spielt das Klimarauschen in der Debatte zum Climate Engineering?

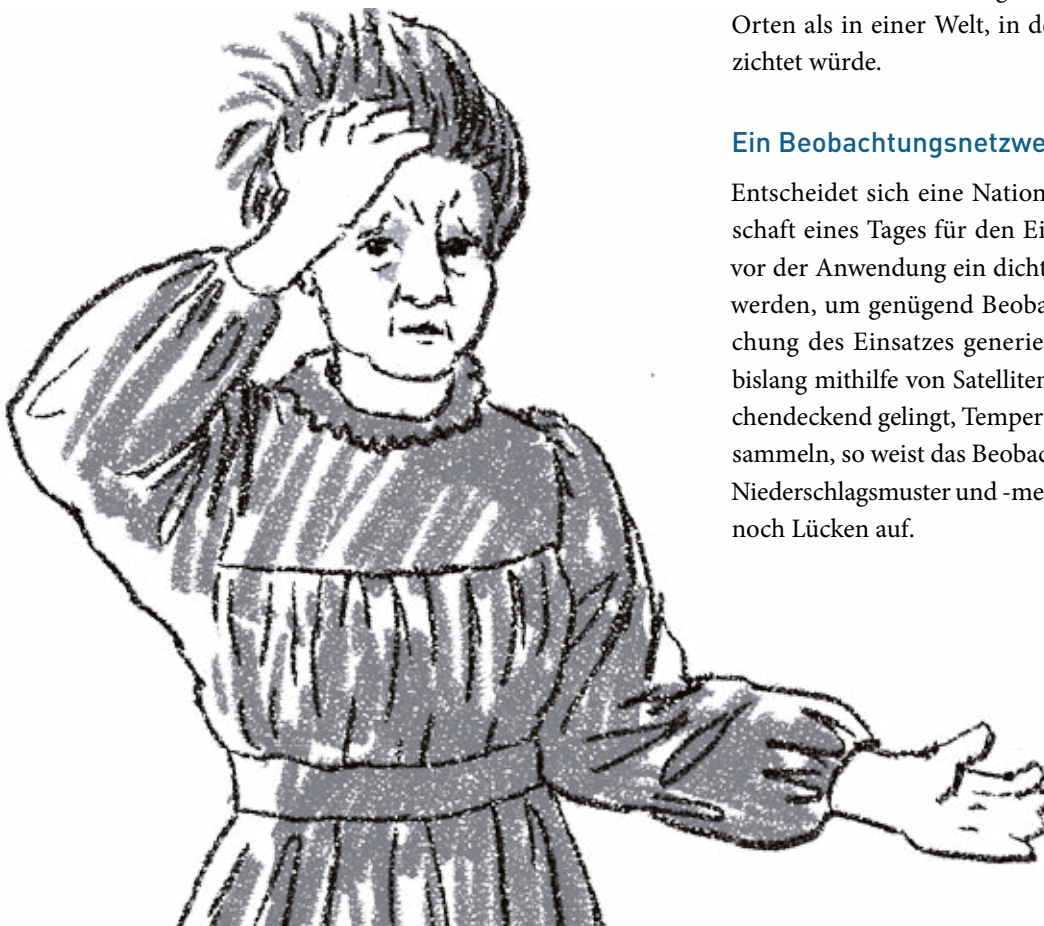
### Natürliche Klimaschwankung oder Climate Engineering – Eine Spurensuche in Modellen

Das Klimarauschen erschwert das Messen und Überwachen der Auswirkungen möglicher CE-Maßnahmen. Es stellt die Wissenschaft vor die Herausforderung, die genauen Ursachen für Klimaveränderungen herauszufinden und dabei zwischen den natürlichen Schwankungen und den Veränderungen im Zuge eines CE-Einsatzes unterscheiden zu können.



## Im Streitfall wäre es schwierig, spezifische Klimateffekte auf den Einsatz einer CE-Methode zurückzuführen.

Wie schwierig diese Aufgabe ist, zeigt die aktuelle Forschung zum Einfluss des menschengemachten Klimawandels auf Extremwetterereignisse wie Hitzeperioden oder Winterstürme. Vereinfacht gesagt sammeln Klimamodellierer direkt im Anschluss an ein Extremereignis alle vorhandenen Beobachtungsdaten und vergleichen diese mit verschiedenen Modellsimulationen. In einigen dieser Simulationen berechnen sie die Treibhausgas-Emissionen des Menschen mit ein, in anderen bleiben diese unberücksichtigt, sodass der Vergleich am Ende zeigt, inwiefern das Wirken des Menschen zu Wahrscheinlichkeit und Schwere des Extremereignisses beigetragen hat. Ohne Modelle wäre eine solche Zuordnung nicht möglich.



Inwieweit dieses Vorgehen auch bei CE-Maßnahmen anwendbar sein könnte, kann derzeit nicht getestet werden. Im Gegensatz zu der Extremwetter-Forschung fehlen den CE-Forschern nämlich Beobachtungsdaten als Vergleichswerte. Ausnahmen bilden große Vulkanausbrüche, deren Staubwolken als Vergleich oder Vorlage für RM-Maßnahmen dienen können, und historische Landnutzungsänderungen. Jeden anderen denkbaren CE-Einsatz aber müssen die Wissenschaftler heutzutage simulieren, denn große Feldexperimente gibt es bislang nicht.

Die Unsicherheit der Modellergebnisse erschwert Aussagen zu einer möglichen Wirksamkeit der CE-Methoden. Sie ist auch der Grund, warum weder CDR- noch RM-Methoden ein „Klima auf Bestellung“ liefern können. Das Klimasystem der Erde ist zu komplex, zu chaotisch und deshalb in seinen Abläufen zu schwer vorherzusagen, als dass der Mensch nur auf den richtigen Knopf drücken müsste, um sein Wunschlima zu erhalten. Mit Climate Engineering ließen sich auch Extremwetter-Ereignisse nicht ausschließen. Stürme, Hitzewellen, Starkregen oder Kälteeinbrüche würde es auch in einer Welt mit einem gezielt beeinflussten Klima geben, dann jedoch vermutlich in anderer Häufigkeit und anderer Art (z. B. mehr Kältewellen, dafür weniger Hitzewellen) sowie an anderen Orten als in einer Welt, in der auf Climate Engineering verzichtet würde.

### Ein Beobachtungsnetzwerk für den Ernstfall

Entscheidet sich eine Nation oder sogar die Staatengemeinschaft eines Tages für den Einsatz von CE-Methoden, sollte vor der Anwendung ein dichtes, globales Messnetz aufgebaut werden, um genügend Beobachtungsdaten für eine Überwachung des Einsatzes generieren zu können. Wenngleich es bislang mithilfe von Satelliten und Wetterstationen schon flächendeckend gelingt, Temperatur- und Atmosphärendaten zu sammeln, so weist das Beobachtungsnetzwerk in Hinblick auf Niederschlagsmuster und -mengen in vielen Regionen der Welt noch Lücken auf.



Gerade diese Werte aber bräuchte die Wissenschaft, um die Auswirkungen eines CE-Einsatzes zu überwachen. Viele der Methoden bergen nämlich das Risiko, dass sich im Zuge eines Einsatzes zum Beispiel Regengebiete verlagern würden und Regionen, die früher ausreichend Niederschlag hatten, plötzlich unter Trockenheit leiden. Neben den gängigen Wetterbeobachtungen sollte es im Falle eines CE-Einsatzes also zum einen zusätzliche Messungen geben, mit deren Hilfe sich die Auswirkungen der CE-Methoden überwachen lassen. Zum anderen müssten Modellstudien durchgeführt werden, um mögliche Effekte des CE-Einsatzes von den natürlichen Klimaschwankungen unterscheiden zu können. Alle auf diese Weise gewonnenen Erkenntnisse sollten umgehend an die Öffentlichkeit und an relevante Entscheidungsträger weitergegeben werden.

Noch schwieriger wird die Überwachung und Zuordnung von Klimaeffekten auf einzelne CE-Methoden, wenn die Menschheit mehrere CE-Methoden gleichzeitig einsetzen sollte. Deren Einflüsse auf das Klima im Einzelnen zu messen und zu überwachen, kann aufgrund der vielen Wechselwirkungen im Klimasystem unter Umständen sehr schwierig sein. Messbar wären zwar einzelne Kenngrößen wie die Strahlungseffekte der ausgebrachten stratosphärischen Partikel oder aber die Kohlendioxid-Konzentration in der Luft. Ein Nachweis darüber, welche CE-Methode am Ende welchen Anteil am Temperaturrückgang hat, könnte wissenschaftlich eine neue Herausforderung darstellen.

### Ein Ansatz, Streitfälle friedlich beizulegen

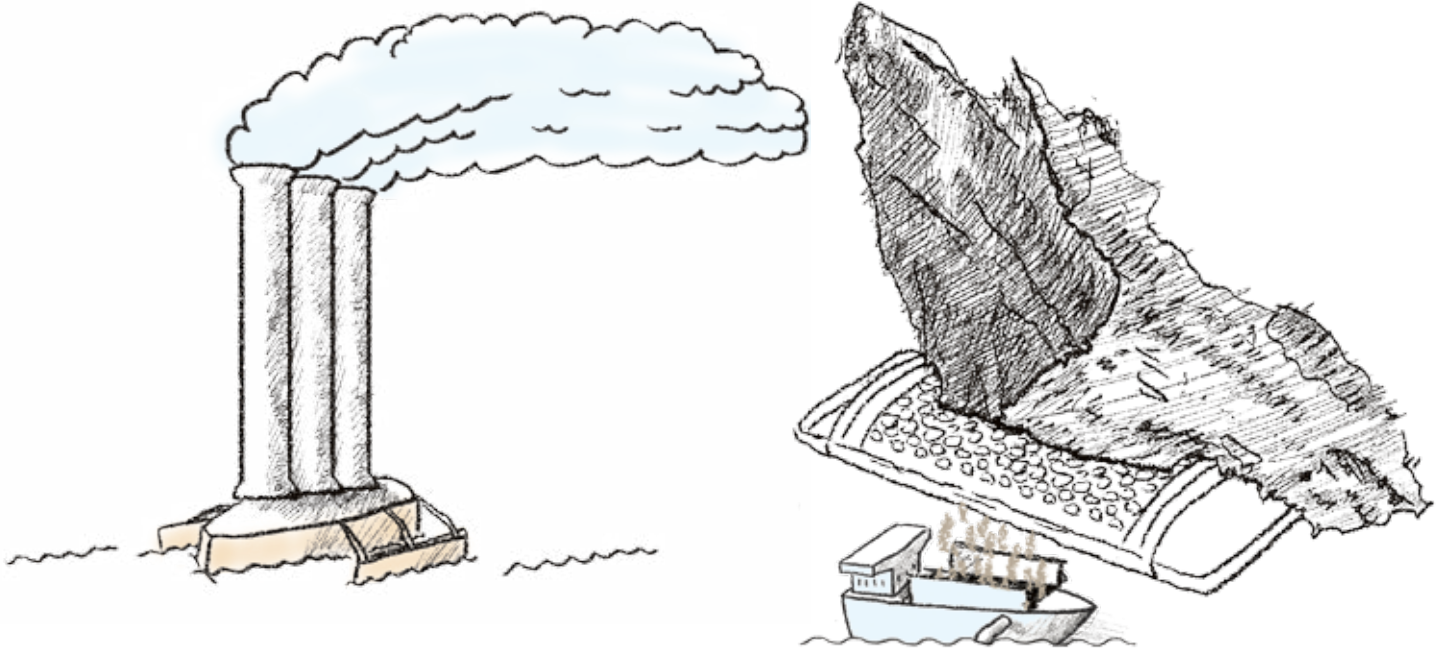
Die Schwierigkeiten bei der Messung, Überwachung und Zuordnung möglicher CE-Einsätze würden auch die internationale Rechtsprechung vor eine neue Herausforderung stellen. Wie soll ein Gericht vorgehen, wenn ein Staat A seinen Nachbarn, Staat B, auf Schadensersatz verklagt, weil dieser zum Beispiel Schwefelpartikel in die Stratosphäre injiziert hat und infolgedessen der Regen in Staat A ausgeblieben ist. Welche Regeln würden in einem solchen Verfahren gelten? Wer könnte haftbar gemacht werden? Welche Beweise könnten angeführt werden?

Ökonomen, Rechtswissenschaftler, Philosophen und Klimawissenschaftler des DFG-Schwerpunktprogrammes zum Climate Engineering sind diesen drängenden Fragen auf den Grund gegangen und haben drei Problemfelder identifiziert:

#### 1. Modellergebnisse statt Fotos, Fingerabdrücken und DNA-Spuren

In Streitfällen zum Climate Engineering könnte keine der beiden Parteien Beweise wie Fotos, Fingerabdrucke oder DNA-Spuren anführen. Ihre einzige Möglichkeit, Aussagen über die Wirkung des CE-Einsatzes zu treffen, wären Modellsimulationen, die zeigen müssten, wie sich das Wetter oder Klima mit und ohne CE-Einsatz entwickelt hätte. Das Problem an dieser Stelle wird jedoch sein, dass es kein universelles Einheitsmodell gibt und geben wird. Im Gegenteil, die Auswahl an Klimamodellen ist heute schon so groß, dass beide Beteiligte mit ziemlicher Sicherheit ein Modell finden würden, dessen Ergebnisse ihre jeweilige Sichtweise bestätigt.





## 2. Fehlende Vergleichsgröße

Jede eingesetzte CE-Methode würde das Klimasystem der Erde in einem bestimmten Ausmaß verändern. Das bedeutet, von diesem Zeitpunkt an kann niemand mehr genau sagen, wie sich das Klima ohne diese Manipulation entwickelt hätte. Im Streitfall würde dem Gericht somit die verlässliche Vergleichsgröße fehlen. Die „Welt ohne CE“ könnte nur noch modelliert werden, dementsprechend wäre jede Annahme über sie mit Unsicherheiten belastet.

## 3. Fehlende Erfahrungswerte

Gerichte greifen bei ihrer Urteilsfindung oft auf Erfahrungswerte zurück. Geht es zum Beispiel um die Schuldfrage bei einem Autounfall, ziehen die Gerichte Gutachter zurate, die schon Hunderte ähnliche Fälle untersucht haben und Unfallursachen miteinander vergleichen können. Im Falle von Climate Engineering werden solche Erfahrungswerte fehlen. Die einzige Vergleichsgröße bleibt die Welt, wie sie ohne Climate Engineering ausgesehen hätte – und diese könnte nur modelliert werden.

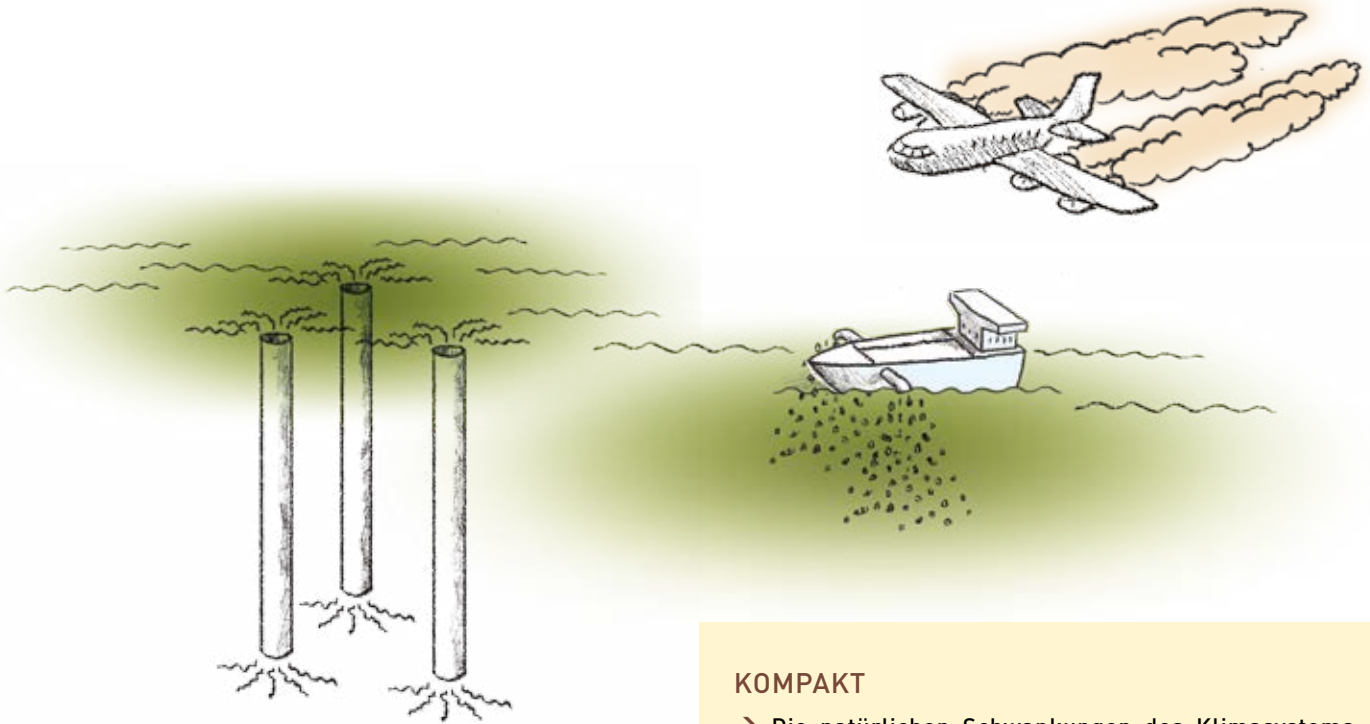
Wie aber sollen Gerichte mit solchen modellbasierten Nachweisen umgehen? Forscher prüfen derzeit neue Möglichkeiten der Haftung, zum Beispiel die sogenannte proportionale Haftung. Deren Leitgedanke ist, dass Streitparteien im Falle einer gerichtlichen Auseinandersetzung zu den Folgen eines CE-Einsatzes in jenem Maße belangt werden, in dem sie zum Risiko des entstandenen Schadens beigetragen haben. Sollte also Staat B durch seinen CE-Einsatz 45 Prozent zum Entstehungsrisiko der Dürreperiode beigetragen haben, wäre er auch für 45 Prozent der Ernteausfälle in Staat A haftbar.

Grundlage dieser Vorgehensweise ist das Konzept der Fraction of Attributable Risk (FAR; Anteil am zurechenbaren Risiko), welches schon erfolgreich in der Extremwetter-Forschung angewendet wird. Dabei berechnen Wissenschaftler den Anteil des menschengemachten Klimawandels an dem Extremwetter-Ereignis durch eine Vergleichsrechnung mit vielen, für diesen Fall geeigneten Klimamodellen. Als Ergebnis erhalten sie dabei jedoch keinen Einzelwert, sondern eine Ergebnisspanne.

Fraglich ist, ob diese FAR-Modellierungen den Beweisführungskriterien internationaler Gerichte entsprechen werden. In den USA beispielsweise müssen Sachverständigenaussagen, die als Beweise eingebracht werden, den sogenannten Daubert-Standard erfüllen. Dabei handelt es sich um einen Kriterienkatalog, der herangezogen wird, um zu überprüfen, ob eine Methode – im Falle von CE wären dies die FAR-Modellierungen – wissenschaftlichen Grundprinzipien entspricht. Die vier Kernfragen sind:

- Ist die Methode empirisch überprüfbar?
- Wurde sie in einer Fachzeitschrift veröffentlicht und hatte sie zuvor ein Begutachtungsverfahren durchlaufen?
- Gibt es eine Aussage über die Unsicherheit der Methode und fließt diese in die Bewertung der Ergebnisse mit ein?
- Ist die Methode in einer maßgeblichen wissenschaftlichen Gemeinschaft allgemein anerkannt?

Dieser strikte Katalog wäre nach Auffassung der DFG-Forscher aus zwei Gründen ungeeignet, um zu überprüfen, ob Modellierungen von Extremwetterereignissen



wissenschaftlichen Grundprinzipien entsprechen. Zum einen sind FAR-Modellierungen empirisch kaum überprüfbar, eben weil Klimamodelle aufgrund der bekannten Unsicherheiten keine exakten Vorhersagen über die Entwicklung des Klimasystems liefern können. Zum anderen wohnt den FAR-Modellierungen eine nur schwer zu beziffernde Unsicherheit inne, weil als Bezugssystem eine hypothetische Welt angenommen wird, wie sie ohne Climate Engineering hätte sein können.

Ein Festhalten an den Kriterien des Daubert-Standards würde demzufolge dazu führen, dass FAR-Werte nicht als Beweismittel anerkannt werden. Eine ersatzlose Streichung der Kriterien wäre jedoch ebenfalls keine Lösung. Dieser Schritt würde die Möglichkeit eröffnen, dass zu viele FAR-Werte als Beweismittel anerkannt werden. Die Prozessparteien hätten somit die Chance, unzuverlässige FAR-Werte einzubringen, und würden auf diese Weise verhindern, dass ein der realen Faktenlage entsprechendes Urteil gefunden werden kann. Der Daubert-Standard müsste deshalb modifiziert werden, wenn Gerichte in der Lage sein sollen, juristisch korrekte Urteile auf Grundlage modellbasierter Nachweise zu fällen.

Die internationale Staatengemeinschaft muss sich also nicht nur darüber einig werden, ob sie CE-Methoden prinzipiell anwenden will und welche Verfahrensvorschriften dafür etabliert werden sollen, sondern auch, welche Richtlinien für den Fall von Streitigkeiten gelten. Denkbar wäre ein internationales Schiedsgericht, dem sich alle Nationen unterstellen und welches Kriterien wie einen modifizierten Daubert-Standard anwendet. Bislang gibt es kein Gericht, welches für internationale Streitfälle bei CE-Einsätzen zuständig wäre. ♦

### KOMPAKT

- Die natürlichen Schwankungen des Klimasystems würden eine Erfolgskontrolle und Überwachung möglicher CE-Maßnahmen extrem erschweren. Sollten mehrere CE-Methoden gleichzeitig angewandt werden, wird es unter Umständen schwierig sein, zu bestimmen, welche Wirkung jede einzelne von ihnen hat.
- Vor einem Einsatz von CE-Methoden sollte ein engmaschiges Beobachtungsnetzwerk aufgebaut werden, welches wie die Wetterdienste Veränderungen wichtiger Klimaparameter verfolgt und mithilfe von Modellierungen überprüft, ob diese Veränderungen auf einen CE-Einsatz zurückzuführen sind.
- Die Tatsache, dass sich CE-Einsätze nur mithilfe von Modellierungen nachweisen und zuordnen lassen, stellt die internationale Rechtsprechung vor große Herausforderungen. DFG-Forscher erwägen deshalb ein neues Haftungsverfahren, das Schadensverursacher anteilig zur Verantwortung zieht. Gleichzeitig bedarf es international abgestimmter Regularien zur Lösung von Streitfällen und einen Kriterienkatalog zur Bewertung modellbasierter Nachweise.

### WEITERLESEN

- Methoden des Climate Engineerings: Lässt sich die Erderwärmung bremsen, wenn man das Klimasystem gezielt beeinflusst? – S. 22
- Ethisch und juristisch betrachtet: Haben wir das Recht oder sogar die Pflicht, das Klima gezielt zu beeinflussen? – S. 42
- EXKURS Modellierung – S. 11

In den meisten Staaten scheuen Politiker einen offenen Diskurs über Climate Engineering. Zu groß sind die potenziellen Konfliktfelder. Dabei wäre eine öffentliche Debatte nötig, um künftig fundierte gesellschaftliche und politische Entscheidungen zum Climate Engineering treffen zu können.

## POLITISCHER DISKURS:

# EINE LÄNGST ÜBERFÄLLIGE DEBATTE

Es wird zunehmend wahrscheinlich, dass die Menschheit CDR-Methoden, aber vielleicht auch RM-Methoden einsetzen muss, um versprochene Klimaziele zu erreichen oder massive Klimaänderungen abzufedern. Daher sollte das Thema zum einen mehr Raum auf der Forschungsagenda einnehmen, zum anderen aber auch auf der politischen Agenda erscheinen. Zwar wird wissenschaftlich international intensiv und kontrovers über Climate Engineering diskutiert, bislang aber hat kein Staat eine klare CE-Politik entwickelt – weder zu CDR noch zu RM – noch eine umfassende öffentliche Diskussion über Climate Engineering angeregt. Wenngleich einzelne Staaten wie etwa Schweden CDR-Methoden mit auf die politische Agenda zum Erreichen eines Netto-Null-Emissionsziels setzen, bleibt die große politische Debatte bisher aus. Viele Regierungen scheuen sich, das Thema breit und offen zu thematisieren, denn die Angst vor gesellschaftlichem Widerstand und dem Eingeständnis einer gescheiterten Emissionsvermeidung ist groß.

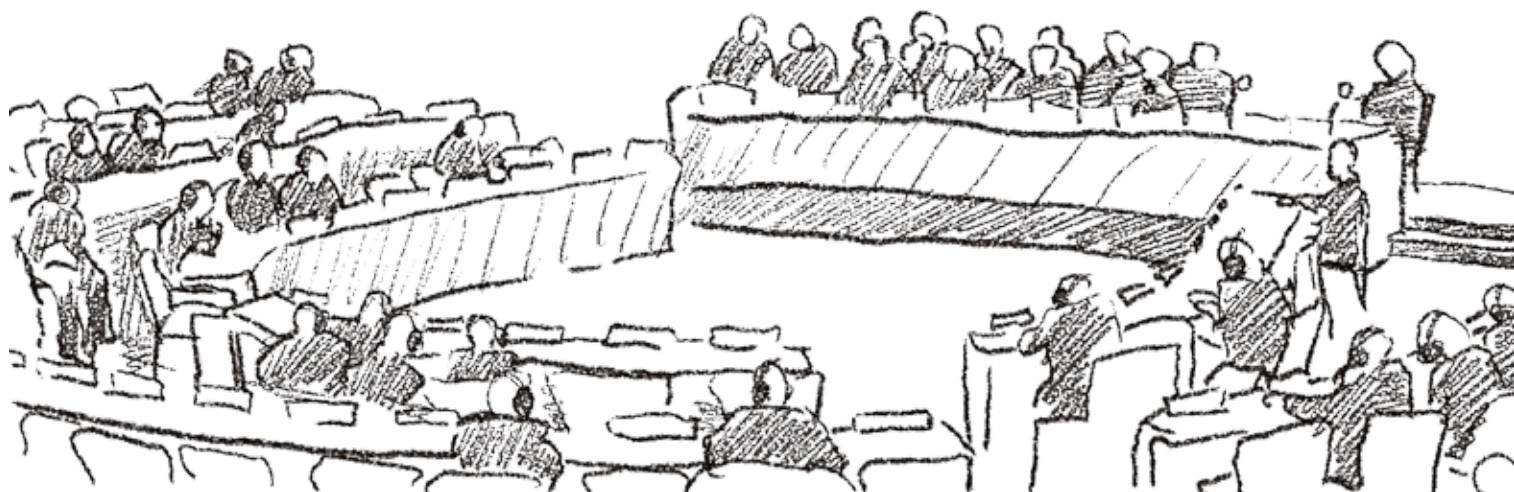
Deshalb machen sich weltweit einzelne Initiativen dafür stark, zumindest das Thema CDR im klimapolitischen Diskurs stärker zu verankern. Das Ziel ist es nicht zuletzt, in verschiedenen politischen Gremien und insbesondere auch bei den Vereinten

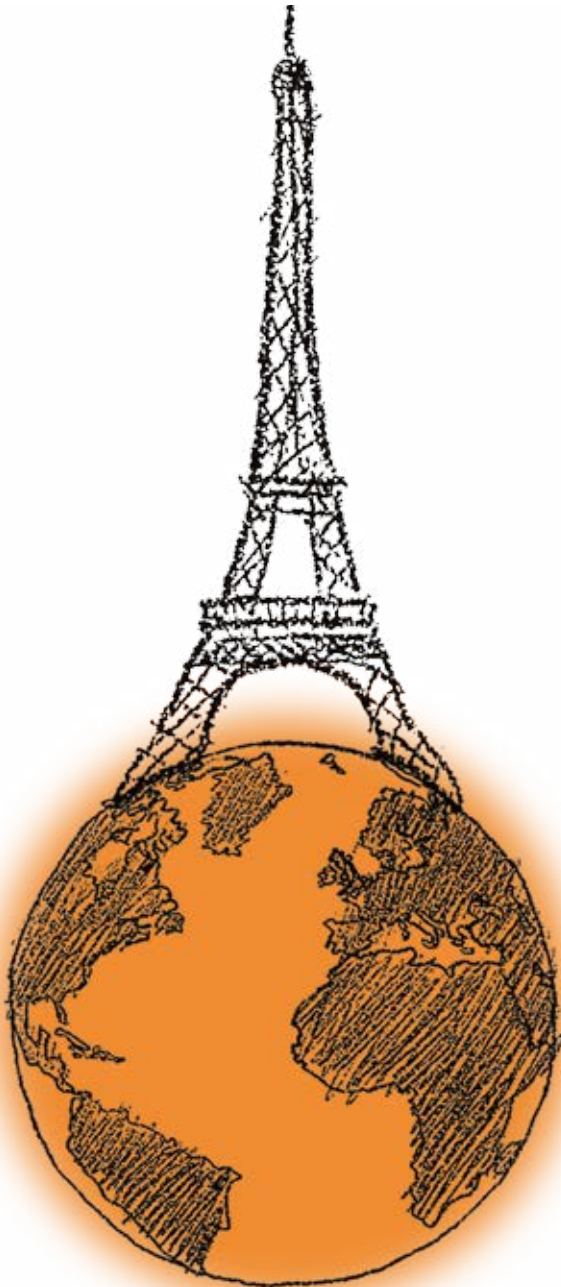
Nationen eine transparente Diskussion über die Erreichung der Klimaziele und damit auch über Climate Engineering als Ergänzung zur Emissionsminderung anzustoßen.

## Beeinflusst die Forschung zum Climate Engineering die politische Agenda?

Politikwissenschaftler betonen, dass bei der Frage, wie CE-Optionen zu bewerten seien und wie diese sich künftig steuern und verwalten ließen, auch die Wissenschaftler entscheidend dazu beitragen, was wann politisch diskutiert wird. So werde die Art, in welcher in der Politik über CDR- und RM-Methoden diskutiert wird, auch dadurch bestimmt, welche Forschungsschwerpunkte und Methoden in der Wissenschaft

**Eine öffentliche Diskussion der Vor- und Nachteile verschiedener Methoden der Kohlendioxid-Entnahme im Kontext der Klimaziele muss transparent geführt werden und auf wissenschaftlich fundierten Informationen aufbauen.**





Der Weltklimarat, dessen Aufgabe es ist, die Politik bei klimawissenschaftliche Fragen zu beraten, betont die Notwendigkeit der Kohlendioxid-Entnahme für das Erreichen der vereinbarten Klimaziele. Eine ehrliche Klimapolitik muss dies ernst nehmen und die entsprechende politisch-gesellschaftliche Debatte über die denkbaren Optionen führen.

aktuell diskutiert werden. Als Beispiel für einen solchen Einfluss der Forschung auf die Politik werden unter anderem die Zusammenfassungen des Weltklimarats aufgeführt. Die darin enthaltenen Abschätzungen der zukünftigen Klimaentwicklung orientieren sich an verschiedenen Zukunftsszenarien bis zum Jahr 2100. Sie entsprechen verschiedenen Entwicklungspfaden der Weltbevölkerung, der Wirtschaft und dem Einsatz erneuerbarer Energien und können zu unterschiedlichen Kohlendioxid-Konzentrationen und Temperaturen führen. Die Entnahme von Kohlendioxid aus der Atmosphäre, meist in Form von BECCS (Bioenergie-Erzeugung gekoppelt mit CCS), wird in den Szenarien des Weltklimarats als bedeutende Methode angenommen. Diese könne wesentlich dazu beitragen, das 1,5-Grad- oder das 2-Grad-Ziel zu erreichen.

In der Konsequenz hat die Integration von BECCS in die Klimaszenarien zu einer Ausweitung des Emissionsbudgets geführt. Zukünftige Emissionsminderungen von deutlich über 100 Prozent, die in den Klimaszenarien durch BECCS realisiert werden, erlauben erst einmal höhere Emissionen. Damit scheinen die Pariser Klimaziele theoretisch erreichbar, praktisch bedeutet das den Einsatz von Methoden zur Kohlendioxid-Entnahme. In der Klimapolitik wird gerne die Erreichbarkeit der Klimaziele, nicht aber der dafür erforderliche Einsatz von Kohlendioxid-Entnahme in großem Maßstab betont. Eine öffentliche Diskussion der Vor- und Nachteile verschiedener Methoden der Kohlendioxid-Entnahme im Kontext der Klimaziele muss transparent geführt werden und auf wissenschaftlich fundierten Informationen aufbauen.

### Wie steht die Bevölkerung zum Einsatz der CE-Methoden?

In Deutschland sind CDR-Methoden wie BECCS weitgehend unbekannt: In einer repräsentativen Befragung gaben 71 Prozent an, zuvor noch nie davon gehört zu haben. Nachdem die Teilnehmer einen kurzen Informationstext über diese Methode gelesen hatten, sprach sich etwa ein Viertel gegen den Einsatz von BECCS aus. Die damit verbundene Abscheidung und Speicherung von Kohlendioxid im Untergrund (CCS) traf auf noch stärkere Ablehnung: 43 Prozent der Befragten sprachen sich dagegen aus. In der Vergangenheit hatte es bereits Proteste gegen diese Technologie gegeben.

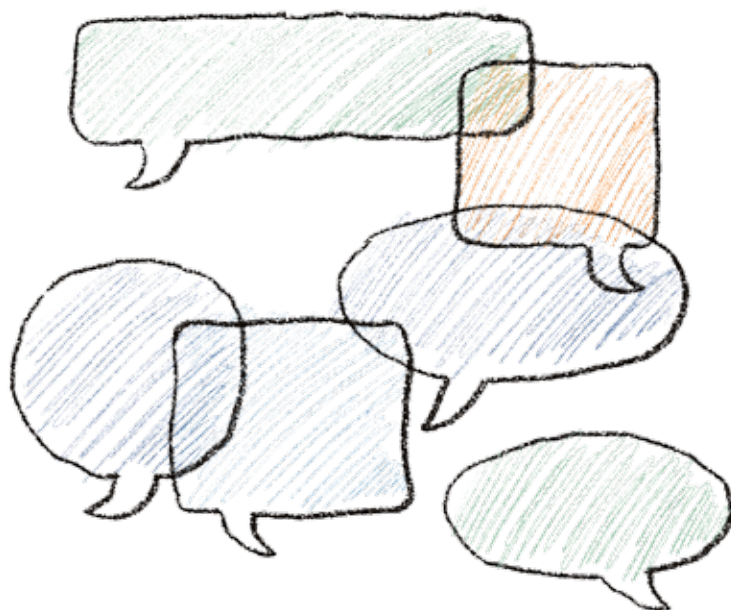
Eine Entscheidung für oder gegen Climate Engineering kann nur auf politischer Ebene getroffen werden, in der Hoffnung, dass eine politische Einigung auch einem gesellschaftlichen Konsens entspricht. Gehört werden müssen dafür auch jene Menschen, die der Klimawandel bereits heute in einem besonderen Ausmaß trifft oder künftig treffen wird.

Derartige Methoden werden also von einem großen Teil der Bevölkerung abgelehnt. Insofern scheut die Politik bislang, sich mit dem Thema der Kohlendioxid-Entnahme zu befassen. Außerdem fürchtet man, damit politisch zu signalisieren, von der bisherigen Strategie der Emissionsvermeidung abrücken zu wollen. CDR- als auch RM-Methoden könnten als Ausrede verwendet werden, den Kohlendioxid-Ausstoß künftig weniger stark zu reduzieren.

Studienteilnehmer, die in einer Befragung umfangreich über den Klimawandel, das 2-Grad-Ziel und die Potenziale der BECCS-Methode informiert wurden, waren anschließend weniger bereit, Kohlendioxid-Emissionen zu vermeiden, als Menschen, die in der gleichen Zeit lediglich über den Klimawandel informiert worden waren. In einer sehr ähnlichen Studie für RM-Methoden zeigten die Teilnehmer jedoch eine verstärkte Bereitschaft zur Emissionsvermeidung. Eine einheitliche Wirkung auf die Bereitschaft, Emissionen zu vermeiden, scheinen die beiden Ansätze also nicht zu haben.

Wie die Bevölkerung letztlich auf Vorhaben zur Entnahme und Speicherung von Kohlendioxid reagieren würde, ist offen. Alle Vorhaben könnten zu Protesten führen oder die Bereitschaft zur Emissionsvermeidung senken. Politiker, die sich unter diesen Voraussetzungen für Methoden der Kohlendioxid-Entnahme wie BECCS als ergänzende Maßnahme zur Emissionsvermeidung einsetzen, würden daher ein gewisses politisches Risiko eingehen. Der Weltklimarat, dessen Aufgabe es ist, die Politik in klimawissenschaftlichen Fragen zu beraten, betont jedoch die Notwendigkeit der Kohlendioxid-Entnahme für das Erreichen der vereinbarten Klimaziele. Eine ehrliche Klimapolitik muss dies ernst nehmen und die entsprechende politisch-gesellschaftliche Debatte über die denkbaren Optionen führen.

Eine Entscheidung für oder gegen Climate Engineering kann nur auf politischer Ebene getroffen werden, in der Hoffnung, dass eine politische Einigung auch einem gesellschaftlichen



Konsens entspricht. Gehört werden müssen dafür auch jene Menschen, die der Klimawandel bereits heute in einem besonderen Ausmaß trifft oder künftig treffen wird. Das Bürgerforum im Rahmen des DFG-Forschungsschwerpunkts Climate Engineering hat beispielsweise gezeigt, wie schwer es Bürgern in einem Industrieland wie Deutschland fällt, die Perspektive der Schwellen- und Entwicklungsländer einzunehmen. Die Teilnehmer konnten sich kaum vorstellen, dass Menschen aus den Wüstengebieten Afrikas die Dringlichkeit von Climate Engineering möglicherweise ganz anders bewerten und im Falle einer Abstimmung auch anders entscheiden könnten. ♦

#### KOMPAKT

- Aus Angst, ein unpopuläres Thema anzufassen, scheuen Politiker vielfach, einen öffentlichen Diskurs über Climate Engineering anzuregen. Dabei wäre dieser für die Meinungsbildung zur Entwicklung von Strategien, wie wir die versprochenen Klimaziele erreichen wollen, enorm wichtig.
- Die Wissenschaft muss diesen Dialog mit anstoßen und umfassend informieren. Sie sollte sich ihrer prägenden Rolle bewusst sein und diese reflektieren.
- Entscheidungen für oder gegen den Einsatz sollten nur im Dialog mit der Bevölkerung getroffen werden. Voraussetzung dafür ist eine umfassende Aufklärung der Bevölkerung über die Chancen und Risiken von CE-Maßnahmen.



Ob Climate Engineering jemals zum Einsatz kommen wird, ist offen. Letztlich dürfte es vom Potenzial und den Risiken einer Methode abhängen, ob sie tatsächlich genutzt werden wird. Vorstellbar sind verschiedene Einstiegsszenarien in eine mögliche Zukunft, in der unser Klima gezielt und im großen Maßstab beeinflusst wird. Manche zeichnen einen schrittweisen Einstieg in die Anwendung von CDR-Methoden. Andere erwarten für die Zukunft eher einen Notfalleinsatz.



## AUSBLICK:

## WIE KÖNNTE DER EINSTIEG IN EINE WELT AUSSEHEN, DEREN KLIMA GEZIELT BEEINFLUSST WIRD?

Vor einem groß angelegten Einsatz einer jeden RM- und CDR-Methode wären noch viele Detailfragen zu beantworten; nicht nur zur Verwaltung und Steuerung solcher Einsätze, sondern auch zu Potenzial, Machbarkeit und Nebenwirkungen der verschiedenen Methoden. Die Beantwortung solcher Fragen ist schwierig, weil bei vielen CDR- oder auch RM-Methoden selbst kleinräumige Feldexperimente nicht genügen werden, um deren Grenzen und Nebenwirkungen vor einem großflächigen Einsatz abzuschätzen. Es werden demzufolge immer Wissenslücken und Unsicherheiten bleiben. Die wissenschaftlichen Analysen, basierend auf Szenarien zukünftiger Entwicklungen, dienen sowohl der integrierten Folgenabschätzung als auch der Identifizierung und Quantifizierung von Unsicherheiten.

Theoretisch könnte jeder Staat Methoden des Climate Engineering anwenden, wenn er dabei ausschließen kann, dass Nachbarstaaten in Mitleidenschaft gezogen werden. Doch eine solche Einschätzung ist kaum möglich, denn im großen Maßstab angewandt können sowohl RM- als auch CDR-Maßnahmen grenzüberschreitende negative Umweltauswirkungen haben, wobei die Effekte landbasierter CDR-Methoden typischerweise regional begrenzter sind als die anderer CE-Methoden. Eine Folge von grenzüberschreitenden Effekten könnten politische Spannungen sein. Aus diesem Grund muss es international abgestimmte Verfahrensregeln sowie Institutionen zur Regelung von Streitfällen geben, bevor mit einem Einsatz von CE-Methoden begonnen werden könnte.

In der öffentlichen Diskussion der letzten Jahre wurde immer wieder starke Kritik an Climate Engineering geäußert, zum Beispiel im Hinblick auf Risiken und Nebenwirkungen, Nachhaltigkeit oder moralische Gesichtspunkte. Insofern stellt sich die Frage, ob oder unter welchen Umständen ein Einsatz von CDR- oder RM-Methoden in Zukunft überhaupt denkbar ist. Manche Experten halten es für realistisch, dass CDR-Methoden mit einer Strategie der kleinen Schritte eingeführt werden könnten. Wie das Beispiel des Aufforstens zeigt, könnte der Übergang zwischen heutigen Klima- und Naturschutzmaßnahmen hin zu einem klimarelevanten CDR-Einsatz fließend sein. Ferner hält man es durchaus für realistisch, dass bestimmte Methoden in der Energielandschaft der Zukunft ihren festen Platz neben Effizienz- oder Klimaschutzmaßnahmen haben werden: ein Szenario, das kein Schwarz-Weiß-Bild, „Einsatz ja oder nein“, zeichnet.

Die folgenden Beispiele zeigen exemplarisch denkbare Wege und Szenarien für einen Übergang in eine Welt, in der das Klima gezielt und im großen Maßstab technisch beeinflusst wird. Diese Zusammenstellung ist wertungsfrei und hat allein das Ziel, den Bogen denkbarer Szenarien aufzuspannen und vorstellbar zu machen.

## 1. Gradueller Übergang von Klimaschutz zur Kohlendioxid-Entnahme

Schon lange bieten verschiedene Unternehmen ihren Kunden die Möglichkeit, deren durch Flugreisen oder Konsum entstandenen Kohlendioxid-Emissionen zu kompensieren. Die Kunden zahlen für jedes erworbene Produkt oder jede geflogene Meile eine gewisse Geldsumme, mit der dann in geeigneten Regionen der Welt zum Beispiel Wiederaufforstungsprojekte finanziert werden. Die Unternehmen profitieren auf diese Weise vom Imagegewinn und generieren einen Wettbewerbsvorteil. Die Kunden wiederum können so den eigenen Kohlendioxid-Fußabdruck reduzieren, ohne dafür ihren Lebensstil grundsätzlich ändern zu müssen. Das standortgemäße Aufforsten sowie die Renaturierung von Mooren und Küstenökosystemen (Seegraswiesen, Mangrovenwälder) werden dadurch in diesem Szenario ausgeweitet. Auf Weide- und Ackerflächen wird die Speicherung von Kohlenstoff durch Einbringung von Pflanzenkohle und durch gezielte Bewirtschaftung erhöht. Dadurch können auch die Bodenfruchtbarkeit und die Widerstandsfähigkeit der Agrarökosysteme verbessert werden. Diese Maßnahmen sind auch mit dem Gedanken des Naturschutzes vereinbar. Dabei muss aber, belegt durch Messungen oder Computermodellierungen, gewährleistet sein, dass die Netto-Klima-Bilanz positiv ist. Das bedeutet zum Beispiel, dass bei der Renaturierung von Feuchtgebieten und Mooren nicht eine verstärkte Emission des Treibhausgases Methan der Kohlendioxid-Aufnahme entgegenwirken darf.

Tatsächlich wird der Atmosphäre hiermit eine beträchtliche Menge Kohlendioxid entnommen. Allerdings reichen diese Maßnahmen nicht aus, um den Klimawandel zu begrenzen. In dem Szenario steigt deshalb die Nachfrage nach Kompensationsmaßnahmen. Die Methoden werden in den Emissionshandel einbezogen, was sich bei steigendem Kohlendioxid-Preis rechnet. Eine Finanzierung über internationale Ausgleichsmechanismen wird angedacht. Die umgesetzten Methoden erreichen ein Ausmaß, bei dem es auch zu Konflikten mit anderen Zielen der Menschheit kommt: Konflikte um Wasser, um Land für die Nahrungsmittelproduktion und in Sachen Naturschutz – beispielsweise bezüglich der Artenvielfalt. In Computermodellen wird außerdem nachgewiesen, dass die großflächigen Aufforstungsprojekte die Niederschlagsmuster verändern.

Was in einzelnen Staaten begann, ohne dass die Bevölkerung oder die Nachbarstaaten zu Schaden kamen, erreicht nun ein Ausmaß, welches eine enge Kooperation zwischen allen Beteiligten, vom Landwirt über die Verbraucher bis hin zu den Politikern, erfordert. Die Politik erkennt – wenn auch spät – den Steuerungsbedarf und setzt mithilfe internationaler Gremien Kontroll- und Steuerungsmechanismen ein.

## 2. Kohlendioxid-Entnahme als integraler Bestandteil einer ambitionierten Klimapolitik

In diesem Szenario haben die Vertragsstaaten des Klimaübereinkommens von Paris bis zum Jahr 2030 die vereinbarten nationalen Ziele (Nationally Determined Contributions, NDC) zur Reduktion der Kohlendioxid-Emissionen erfüllt. Gleichzeitig wird eine politische Initiative gestartet, mit der die Reduktion der Emissionen nach 2030 noch verstärkt wird. Damit soll das langfristige 2-Grad-Ziel erreicht werden. Zu dieser international abgestimmten und differenzierten Klimapolitik ab dem Jahr 2030 gehört auch die Erhöhung des Kohlendioxid-Preises, was zu einer drastischen Verringerung der Kohlendioxid-Emissionen beiträgt. Zudem wird der Strom- und Wärmesektor durch eine vollständige Umstellung auf erneuerbare Energien dekarbonisiert. Der Verkehrssektor wird größtenteils elektrifiziert, weshalb viele Emissionen durch Benzin und Diesel entfallen. Energiesparmaßnahmen werden umgesetzt. Dennoch zeigt sich, dass alle diese Maßnahmen nicht ausreichen, um die Erderwärmung auf 2 Grad Celsius zu begrenzen: Um eine Stabilisierung der Temperatur zu erreichen, müssen die Emissionen von Kohlendioxid und anderen Treibhausgasen in allen Ländern auf null sinken, aus Gründen der Gerechtigkeit zuerst in den reicheren Ländern. Doch einige Emissionsquellen bleiben. So werden Treibhausgase noch immer in der Industrie und der Landwirtschaft freigesetzt. Zudem zeigt sich, dass die ambitionierte Klimapolitik zu spät gekommen ist und dass das verbleibende Budget für 2 Grad Celsius in absehbarer Zeit überschritten werden wird. Deshalb beginnen die industrialisierten Länder, massiv CCS-Infrastrukturen aufzubauen, um so ihre Industrie-Emissionen zu reduzieren und aus der Atmosphäre mittels Direct Air Capture entnommenes CO<sub>2</sub> einzulagern. So werden noch vorhandene Restemissionen ausgeglichen und zunehmend auch das bereits

überschrittene Budget kompensiert. Regierungen, die ihre CCS-Infrastruktur nicht schnell genug ausbauen konnten, stehen vor der Herausforderung, dass CO<sub>2</sub>-Emissionszertifikate importiert werden müssen, um die noch vorhandenen Restemissionen auszugleichen. Beim Import von Zertifikaten aus tropischen Ländern muss aber beachtet werden, dass massive Aufforstung und Biomasse-Anbau einen hohen Landbedarf haben, der zur Vertreibung indigener Bevölkerung, zu steigenden Nahrungsmittelpreisen und zu Auswirkungen auf die Artenvielfalt sowie den Wasserkreislauf führen könnten. Gleichzeitig könnten die sich entwickelnde BECCS-Industrie und der Verkauf von Emissionsrechten zu vermehrtem Wohlstand, mehr Arbeitsplätzen und verbesserter Lebensqualität führen. Um die Voraussetzungen für eine faire und nachhaltige Ausgestaltung der Politikinitiative zu schaffen, wird Technologieentwicklungs- und -transferpolitik betrieben. Über die Emissionen von Treibhausgasen und die Verminderung des Kohlendioxids in der Atmosphäre durch die Kohlendioxid-Entnahme führt eine internationale Behörde Buch. Diese stimmt die Maßnahmen zudem international ab.

### 3. Küstenländer setzen CE-Methoden im Meer ein

Für Küstenländer wäre ein anderes, naheliegendes Szenario für den Einstieg in Climate Engineering denkbar: Die Staaten setzen in ihren Hoheitsgewässern als Teil ihrer Klimaschutzstrategie ozeanbasierte Technologien zur Kohlendioxid-Entnahme ein. Zunächst wird das Einbringen alkalischer Materialien beim Bau von Küstenschutzanlagen etabliert, wodurch praktische Erfahrungen über das Lösungsverhalten, CO<sub>2</sub>-Entnahmepotenzial und ökologisch tolerierbare Grenzwerte gewonnen werden. Die Küstenländer setzen durch, dass das gezielte Auflösen von alkalischem Gesteinsmehl im europäischen Emissionsrecht handel verrechnet werden kann, solange enge Grenzwerte für die Wasserchemie eingehalten werden. Dies schafft finanzielle Anreize, die dazu führen, dass viele Unternehmen die Technologie der Einbringung von Basaltstaub vorantreiben. Aufgrund strenger Umweltauflagen beim Abbau von Basalt, der hohen Transportkosten und der engen Grenzwerte für die Chemie des Meeresswassers gehen einzelne Unternehmen dazu über, den Abbau und das Einbringen von Basaltstaub in den Ozean nach Australien zu verlagern. Nach einer Erweiterung des europäischen

Emissionshandelssystems auf Australien beginnt die dortige Bergbauindustrie mit dem Basaltabbau in großem Maßstab, um die CO<sub>2</sub>-Entnahme durch künstliche Verwitterung im Ozean voranzutreiben. Nach einem Jahrzehnt wird eine jährliche CO<sub>2</sub>-Entnahme von einer Milliarde Tonnen CO<sub>2</sub> alleine in europäischen und australischen Hoheitsgewässern erreicht. Vor den Küsten Australiens kommt es aber aufgrund der dortigen laxen Umweltbestimmungen immer wieder zu großen Algen- und Fischsterben. Die Erweiterung von internationalen Abkommen zum Schutz mariner Ökosysteme um das Einbringen von Basaltstaub führen zu verbindlichen, einzuhaltenden Obergrenzen für die chemische Beeinflussung des Meerwassers weltweit.

### 4. Regen nach Bedarf

Von neuen Forschungsergebnissen ermutigt, versuchen China, Saudi-Arabien und Indien etwa ab dem Jahr 2030 durch Wolkenmodifikation den Niederschlag auf ihren Gebieten zu regulieren. Viele andere Länder blicken interessiert auf die Möglichkeit, dadurch die landwirtschaftliche Produktivität zu erhöhen und angenehmere Wetterbedingungen zu schaffen. Auch wenn der Erfolg der Maßnahmen umstritten ist, steigt die Nachfrage nach Wolkenmodifikation. Unternehmen investieren in die weitere Erforschung und Entwicklung der Technologie. Ein neuer Industriezweig entsteht – ein neues Zeitalter der landwirtschaftlichen Produktion wird eingeläutet. Global kommt es zu einer gleichmäßigeren Verteilung der Wolken. Kontrollierten Niederschlag gibt es für alle – die es sich leisten können.

Zusätzlich treten lokale Temperatureffekte ein. Das Grundprinzip scheint zu funktionieren, deshalb wird damit begonnen, marine Schichtwolken zu modifizieren, um gezielt dem weltweiten Temperaturanstieg entgegenzuwirken. Stimmen, die vor möglichen Veränderungen der Ozeanströmungen und den daraus resultierenden Veränderungen des globalen Klimasystems warnen oder auf negative Folgen wie das Ausbleiben von Regen in Gebieten, in denen die Wolken nicht modifiziert werden, hinweisen, werden überhört. Die meisten sind von den Vorteilen des neuen Wetters überzeugt. Außerdem versichert die wolkenmodifizierende Industrie, dass ihre Technologie keine nennenswerten Nebenwirkungen hat.

## 5. Zunahme der Wetterextreme macht Strahlungsmanagement erforderlich

*Um das Jahr 2030 herum wird immer klarer, dass die meisten Staaten ihre erklärten Ziele zur Emissionsreduktion weiterhin deutlich verfehlen. Extreme Wetterereignisse wie Dürren, tropische Stürme und Überschwemmungen treten weltweit immer häufiger auf. In den Augen der Öffentlichkeit reichen die Maßnahmen zur Reduktion des Treibhausgas-Ausstoßes und zur Anpassung an die Klimaveränderungen nicht mehr aus, um dem Klimawandel entgegenzuwirken. In vielen Ländern werden die Stimmen lauter, die die Einbringung reflektierender Partikel in die Stratosphäre fordern, weil es schneller wirkt als die Reduzierung der Treibhausgas-Emissionen oder CDR-Methoden. Neben den direkt betroffenen Staaten wird der Einsatz auch von Staaten unterstützt, die den Folgen von Meeresspiegelanstieg oder Gletscherschwund stark ausgesetzt sind, sowie von verschiedenen NGOs. Eine Koalition der Willigen bildet sich, welche den Einsatz der RM-Methoden vorantreibt, obwohl die langfristigen Auswirkungen noch nicht absehbar sind. Kritiker befürchten, dass die Methode die Senkung des Treibhausgas-Ausstoßes ganz in den Hintergrund drängen wird, wenn sie erst einmal eingesetzt wird. Die Befürworter verpflichten sich deshalb, den Einsatz von RM-Methoden mit dem verstärkten Einsatz von Maßnahmen zur Emissionsreduzierung und Kohlendioxid-Entnahme zu verbinden. Es wird eine internationale Organisation zur Überwachung und Kontrolle des RM-Einsatzes und der Treibhausgas-Einsparung geschaffen. Aber viele Fragen bleiben offen: Werden die Versprechungen auch eingehalten werden? Hat die neue internationale Organisation ausreichend Durchsetzungskraft, um den Einsatz zu kontrollieren und zu begrenzen? Wird es durch die Einbringung reflektierender Partikel tatsächlich überall weniger Extremereignisse geben, oder werden bald Rufe erklingen, damit wieder aufzuhören?*

## Tut CE-Forschung not?

Ob eines der hier skizzierten Szenarien so oder in ähnlicher Form tatsächlich eintreten wird, ist natürlich völlig offen. Noch gibt es viel zu wenige Erkenntnisse zur Wirksamkeit und zu den Folgen der verschiedenen RM- und CDR-Methoden sowie dazu, wie deren Anwendung politisch gestaltet werden könnte. Das Thema findet auf der politischen Agenda weltweit nach wie vor kaum Beachtung. In Anbetracht der Tatsache, dass zumindest CDR-Methoden vermutlich zu einer ernstzunehmenden Option im Kampf gegen den Klimawandel werden könnten, ist dies eine unbefriedigende Situation. Die Erforschung der verschiedenen Methoden und Möglichkeiten einer möglichst konfliktfreien Anwendung ist von großer Relevanz sowohl für die Bewertung unserer zukünftigen Optionen im Umgang mit dem Klimawandel als auch für die bewusste Gestaltung unserer Zukunft – unabhängig davon, ob diese Methoden künftig tatsächlich eingesetzt werden oder nicht. ♦

## WICHTIGE QUELLEN UND HINWEISE

- Fuss, S. et al. (2018): **Negative emissions – Part 2: Costs, potentials and side effects**. Environmental Research Letters 13.  
<https://doi.org/10.1088/1748-9326/aabf9f>
- Haszeldine, R. S.; Flude, S.; Johnson, G.; and Scott, V. (2018): **Negative emissions technologies and carbon capture and storage to achieve the Paris Agreement commitments**. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 376(2119).  
<https://doi.org/10.1098/rsta.2016.0447>
- Hubert, A.-M. (2017): **Code of conduct for responsible geoengineering Research**. University of Calgary.  
<https://ucalgary.ca/grgproject/files/grgproject/revised-code-of-conduct-for-geoengineering-research-2017-hubert.pdf>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (2018): **Global Warming of 1.5°C – An IPCC Special Report**. IPCC, Geneva, Switzerland.  
<https://www.ipcc.ch/sr15/>
- Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)] (2014): **Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. IPCC, Geneva, Switzerland.  
<https://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/>
- Lawrence, M. G. et al. (2018): **Evaluating climate geoengineering proposals in the context of the Paris Agreement**. Nature Communications.  
<https://doi.org/10.1038/s41467-018-05938-3>
- Minx, J. C. et al. (2018): **Negative emissions – Part 1: Research landscape and synthesis**. Environmental Research Letters 13.  
<https://doi.org/10.1088/1748-9326/aabf9b>
- Ott, K.; Pohlens, J. (2018): **Bürgergutachten zum Bürgerforum „Climate Engineering – eine Möglichkeit gegen den Klimawandel?“**, Schwerin. Download unter  
[https://www.spp-climate-engineering.de/buergerforum.html?file=files/ce-projekt/media/download\\_PDFs/BF-Gutachten.pdf](https://www.spp-climate-engineering.de/buergerforum.html?file=files/ce-projekt/media/download_PDFs/BF-Gutachten.pdf)
- Rickels, W.; Klepper, G.; Dovern, J.; Betz, G.; Brachatzek, N.; Cacean, S.; Güssow, K.; Heintzenberg J.; Hiller, S.; Hoose, C.; Leisner, T.; Oschlies, A.; Platt, U.; Proelß, A.; Renn, O.; Schäfer, S.; Zürn M. (2011): **Gezielte Eingriffe in das Klima? Eine Bestandsaufnahme der Debatte zu Climate Engineering. Sondierungsstudie für das Bundesministerium für Bildung und Forschung**.  
[https://www.spp-climate-engineering.de/Downloads\\_d.html?file=files/ce-projekt/media/download\\_PDFs/CE\\_gesamtstudie.pdf](https://www.spp-climate-engineering.de/Downloads_d.html?file=files/ce-projekt/media/download_PDFs/CE_gesamtstudie.pdf)
- Schäfer, S.; Lawrence, M.; Stelzer, H.; Born, W.; Low, S.; Aaheim, A.; Adriázola, P.; Betz, G.; Boucher, O.; Carius, A.; Devine-Right, P.; Gullberg, A. T.; Haszeldine, S.; Haywood, J.; Houghton, K.; Ibarrola, R.; Irvine, P.; Kristjansson, J.-E.; Lenton, T.; Link, J. S. A.; Maas, A.; Meyer, L.; Muri, H.; Oschlies, A.; Proelß, A.; Rayner, T.; Rickels, W.; Ruthner, L.; Scheffran, J.; Schmidt, H.; Schulz, M.; Scott, V.; Shackley, S.; Tänzler, D.; Watson, M.; Vaughan, N. (2015): **The European Transdisciplinary Assessment of Climate Engineering (EuTRACE): Removing Greenhouse Gases from the Atmosphere and Reflecting Sunlight away from Earth**.  
[https://www.iass-potsdam.de/sites/default/files/2018-06/EuTRACE\\_report\\_digital\\_second\\_edition.pdf](https://www.iass-potsdam.de/sites/default/files/2018-06/EuTRACE_report_digital_second_edition.pdf)
- United Nations Environment Programme (2018): **Emissions Gap Report 2018**. ISBN: 978-92-807-3726-4  
<http://www.unenvironment.org/emissionsgap>
- van Vuuren, D. P. et al. (2018): **Alternative pathways to the 1.5 °C target reduce the need for negative emission technologies**. Nature Climate Change.  
<https://doi.org/10.1038/s41558-018-0119-8>

Diese Broschüre ist im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit des Schwerpunktprogrammes 1689 der Deutschen Forschungsgemeinschaft „Climate Engineering: Risks, Challenges, Opportunities?“ entstanden.

Viele Wissenschaftler des SPP 1689 haben mit ihrem Fachwissen zu den verschiedenen Aspekten dieser Broschüre beigetragen.

## MITWIRKENDE DES SPP 1689

**Thorben Ammann**, Universität Hamburg

**Christian Baatz**, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel

**Nico Bauer**, Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung

**Silke Beck**, Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung UFZ, Leipzig

**Lena Boysen**, Max-Planck-Institut für Meteorologie, Hamburg

**Dieter Gerten**, Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung

**Timo Goeschl**, Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg

**Jens Hartmann**, Universität Hamburg

**Nina Janich**, Technische Universität Darmstadt

**Kristine Karstens**, Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung

**David Keller**, GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel

**Elmar Kriegler**, Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung

**Mark Lawrence**, Institute for Advanced Sustainability Studies, Potsdam

**Thomas Leisner**, Karlsruher Institut für Technologie

**Christine Merk**, Institut für Weltwirtschaft, Kiel

**Andreas Oeschies**, GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel

**Konrad Ott**, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel

**Tobias Pfrommer**, Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg

**Julia Pongratz**, Ludwig-Maximilians-Universität München

**Alexander Proelß**, Universität Hamburg

**Johannes Quaas**, Universität Leipzig

**Martin Quaas**, Universität Leipzig

**Wilfried Rickels**, Institut für Weltwirtschaft, Kiel

**Hauke Schmidt**, Max-Planck-Institut für Meteorologie, Hamburg

**Sebastian Sonntag**, Max-Planck-Institut für Meteorologie, Hamburg

**Harald Stelzer**, Karl-Franzens-Universität Graz

**Jessica Strefler**, Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung

## DANKSAGUNG

Unser Dank gilt allen Wissenschaftlern des SPP 1689 für ihren Beitrag, ihre Geduld und wichtigen kritischen Hinweise zur Darstellung dieses sehr komplexen Themas. Darüber hinaus möchten wir uns auch bei den Wissenschaftlern außerhalb des SPP 1689 bedanken, die mit ihrer Expertise das Entstehen dieser Broschüre ermöglicht haben:

Oliver Geden, von der Stiftung Wissenschaft und Politik, Berlin, Klaus Wallmann und Matthias Haeckel vom GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel, Vivian Scott von der University of Edinburgh sowie Bruno Glaser von der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg.

*Die Autoren und das Team  
der Öffentlichkeitsarbeit des SPP 1689*

## IMPRESSUM

**Herausgeber:** Schwerpunktprogramm 1689 der Deutschen Forschungsgemeinschaft „Climate Engineering: Risks, Challenges, Opportunities?“ (SPP 1689).

**Kontakt:** Ulrike Bernitt  
info-ce@spp-climate-engineering.de  
www.spp-climate-engineering.de

**Redaktion und Gesamtleitung:** Ulrike Bernitt

**Text:** Sina Löschke // www.schneehohl.net und  
Tim Schröder // www.schroeder-tim.de

**Lektorat:** Henning Bartels // www.henning-bartels.eu

**Layout und Illustrationen:** Rita Erven

**Fotografien:** unsplash.com: Shawn Ang // Etienne Bosiger // Willian Justen De Vasconcellos // Steve Halama // Chaz McGregor // Martin Sanchez // Oliver Sjostrom // Romello Williams // Markus Zymmer /// pixabay.de: Igor Ovsyannykov // Brin Weins

**Klimaneutral gedruckt** auf Recycling Papier aus 100 % Altpapier, FSC® zertifiziert und ausgezeichnet mit dem Blauen Umweltengel und dem EU Ecolabel.

# SPP 1689

## DAS DFG-SCHWERPUNKTPROGRAMM „CLIMATE ENGINEERING: RISKS, CHALLENGES, OPPORTUNITIES?“ (SPP 1689)

Das DFG-Schwerpunktprogramm 1689 hat es sich seit 2013 zur Aufgabe gemacht, die Option Climate Engineering (CE) zu bewerten und die Folgen möglicher CE-Einsätze abzuschätzen. Das stark interdisziplinäre Schwerpunktprogramm ist 2012 von einer Reihe besorgter Wissenschaftler initiiert worden, um die großen Unsicherheiten über die Auswirkungen verschiedener CE-Methoden auf Umwelt und Gesellschaft zu verringern und damit eine Basis für einen verantwortungsvollen Umgang mit Climate Engineering zu schaffen. Neben der naturwissenschaftlich-technischen Dimension sind daher in den vergangenen sechs Jahren auch soziale, politische, rechtliche und ethische Aspekte untersucht worden. Am SPP 1689 sind 20 Universitäten und Forschungs-

institute aus dem deutschsprachigen Raum beteiligt. Feldexperimente oder Forschung zur konkreten Entwicklung von CE-Methoden finden im SPP 1689 nicht statt.

Ein wesentliches Anliegen des Schwerpunktprogramms ist die Transparenz der Forschung. Die Öffentlichkeitsarbeit ist daher ein wichtiger Bestandteil des Programms. Kernstück dieser Arbeit war die Weiterentwicklung des vom Kiel Earth Institute entwickelten Newsportals [www.climate-engineering.eu](http://www.climate-engineering.eu). Hier werden tagesaktuell Nachrichten aus Wissenschaft, Politik und Medien zu Climate Engineering zusammengetragen. Auch die vorliegende Broschüre, in der wichtige Fakten und Debatten zu Climate Engineering zusammengefasst werden, ist Teil dieser Öffentlichkeitsarbeit.

Mehr Informationen zum Schwerpunktprogramm und den einzelnen Projekten der beiden Phasen finden Sie unter:

[www.spp-climate-engineering.de](http://www.spp-climate-engineering.de)



## TRICKFILM ÜBER CLIMATE ENGINEERING AUF YOUTUBE

<https://www.spp-climate-engineering.de/trickfilm.html>



[www.spp-climate-engineering.de](http://www.spp-climate-engineering.de)