Vol. 13, No. 4, 2018

akademien der wissenschaften schweiz

swiss academies factsheets

www.akademien-schweiz.ch



Emissionen rückgängig machen oder die Sonneneinstrahlung beeinflussen:

Ist «Geoengineering» sinnvoll, überhaupt machbar und, wenn ja, zu welchem Preis?

Das Klimaübereinkommen von Paris strebt als Ziel eine Begrenzung der globalen Erwärmung auf deutlich unter 2 Grad Celsius, wenn möglich sogar 1,5 Grad Celsius an. Verschiedene Szenarien zeigen, dass sich diese Ziele allein durch Emissionsminderungsmassnahmen nur noch mit sehr grossen Anstrengungen erreichen lassen. Das motiviert die Suche nach zusätzlichen Lösungsmöglichkeiten. Technische Eingriffe ins Klimasystem, oft mit Sammelbegriffen wie «Geoengineering» oder «Klimaintervention» bezeichnet, werden deshalb diskutiert. Die meisten Massnahmen sind jedoch mit bisher kaum abschätzbaren Kosten, Risiken und unerwünschten Nebenwirkungen verbunden. Während einige Massnahmen erst in der Theorie existieren, wurden andere im Kleinformat getestet. Jedoch fehlen bei all diesen Versuchen Kenntnisse über die Auswirkungen der Anwendung im benötigten grossen Massstab. Da die Massnahmen nicht überall auf der Erde die gleichen Auswirkungen hätten, sind ausserdem ethische Fragen der globalen und regionalen Gerechtigkeit besonders wichtig und müssten durch ein internationales Regelwerk erfasst werden.

Ausgangslage

Mit dem Klimaübereinkommen von Paris hat sich die Weltgemeinschaft das Ziel gesetzt, die globale Erwärmung auf weniger als 2 Grad Celsius, wenn möglich sogar auf 1,5 Grad Celsius gegenüber der vorindustriellen Zeit zu begrenzen. Dieser Absichtserklärung stehen die gegenwärtig deklarierten nationalen Emissionsminderungsziele gegenüber. Diese würden – sofern sie eingehalten werden – zu einer globalen Erwärmung etwa im Bereich von 2 bis 4 Grad Celsius führen, sind also bei weitem ungenügend. Auch die jüngsten wirtschaftlichen und politischen Entwicklungen lassen nicht erwarten, dass die Anstrengungen zur Emissionsminderung ausreichen werden, um die gesetzten Begrenzungsziele allein mit Minderungsmassnahmen zu erreichen.

Dies widerspiegelt sich auch in praktisch allen verfügbaren und von der Wissenschaft verwendeten Szenarien für die Einhaltung des 1,5-Grad-Ziels – und auch in vielen für die Einhaltung des 2-Grad-Ziels –, indem diese «negative» CO_2-Emissionen – das heisst Massnahmen zur Entnahme von CO_2 aus der Atmosphäre – beinhalten. Einige Szenarien enthalten auch technische Aktivitäten zur Beeinflussung der Sonneneinstrahlung. Tabelle 1 zeigt die Bedeutung, die in den vom IPCC begutachteten Szenarien und in der wissenschaftlichen Literatur der CO_2-Entnahme beigemessen wird. Wie diese Zahlen zeigen, wäre mit den gegenwärtigen jährlichen Emissionen das vorhandene Emissionsbudget für die Einhaltung des 1,5-Grad-Ziels also bereits in vier bis höchstens zwanzig Jahren aufgebraucht.

Technische Massnahmen, um bereits erfolgte CO_2-Emissionen nachträglich wieder aus der Atmosphäre zu entnehmen oder wenigstens die Erwärmung zu dämpfen, können deshalb aus den Diskussionen über die Begrenzung des Klimawandels nicht mehr ausgeklammert werden. Dies ist auch vor dem Hintergrund zu sehen, dass einzelne dieser technischen «Korrekturmassnahmen» unter Umständen billiger zu stehen kommen könnten als gewisse Emissionsminderungsmassnahmen.

Zwei unterschiedliche Ansätze

Bei den Massnahmen, die manchmal unter Begriffen wie «Geoengineering» oder «Klimaintervention» zusammengefasst werden, müssen zwei fundamental unterschiedliche Ansätze unterschieden werden. Diese sollen deshalb jeweils getrennt betrachtet werden:

Mit der **Entnahme von CO_2 aus der Atmosphäre** (häufigste Fachbegriffe dafür sind «Carbon Dioxide Removal», **CDR** oder «Negative Emissionstechnologien») wird versucht, einen Teil der menschengemachten CO_2-Emissionen wieder rückgängig zu machen und den Anstieg der CO_2-Konzentration zu bremsen. Damit wird die Hauptursache des Klimawandels angegangen. Beispiele für CDR sind die energetische Nutzung von Biomasse in Kombination mit der Abscheidung und geologischen Speicherung von CO_2 (BECCS); das technische Einfangen von CO_2 aus der Atmosphäre mit anschliessender geologischer Speicherung (DACS); das Binden von CO_2 aus der Atmosphäre in Wäldern durch grossflächige Aufforstungen; das Einlagern von Kohlenstoff im Boden durch geeignete Bodenbewirtschaftung oder Pflanzenkohle; die Düngung von Ozeanen zur Verstärkung des Algenwachstums mit Bindung von CO_2; oder die künstliche Verstärkung der Gesteinsverwitterung, wobei Kohlenstoff im Gestein eingebaut wird. Zu beachten ist, dass CDR aufgrund der Trägheit des Klimasystems nur verzögert wirken, das heisst die Auswirkungen frühestens nach einigen Jahren bis Jahrzehnten erkennbar werden.

Wo liegt der Unterschied von CDR zu «normalen» Emissionsminderungsmassnahmen der aktuellen Klimapolitik? In beiden Fällen geht es ja um die Beeinflussung der CO_2-Konzentration in der Atmosphäre. Mit Emissionsminderungsmassnahmen wird angestrebt, dass CO_2 gar nicht erst in die Atmosphäre gelangt, während mit CDR das CO_2 wieder aus der Atmosphäre entnommen wird. Deshalb wird auch die CO_2-Abscheidung an der Quelle, zum Beispiel bei Kraftwerken, und anschliessende Einlagerung im Untergrund (das so genannte «Carbon Capture and Storage», CCS) meist den Emissionsminderungsmassnahmen und nicht dem CDR zugerechnet.

Tabelle 1: Abschätzungen bezüglich der Rolle von Massnahmen zur CO_2-Entnahme aus der Atmosphäre (CDR) bei der Erreichung der Ziele des Übereinkommens von Paris. (Quelle: EASAC 2018)

	Gt CO_2
Bereich der geschätzten Gesamtmenge der verbleibenden CO_2-Emissionen, die maximal noch emittiert werden dürften, um das 1,5-Grad-Ziel zu erreichen	130 bis 700
Gegenwärtige globale CO_2-Emissionen pro Jahr	36
Annahmen der jährlichen CO_2-Entnahme nach 2050 in den im IPCC-Bericht begutachteten Modellen	–12
Bereich der Annahmen für jährliche negative CO_2-Emissionen in weiterer wissenschaftlicher Literatur	–7 bis –70

Bei der **Beeinflussung der Sonneneinstrahlung** («Solar Radiation Management», **SRM**) wird hingegen versucht, ein Symptom des Klimawandels, nämlich die Erwärmung, zu bekämpfen. Dies geschieht, indem die Reflexion der Sonnenstrahlung in der Atmosphäre oder an der Erdoberfläche künstlich erhöht wird und damit der Erwärmung der Erdoberfläche entgegengewirkt.[1] Das kann zum Beispiel durch das Einbringen von Aerosolen in höhere Atmosphärenschichten erreicht werden. Weiter wird auch über die künstliche Aufhellung von Wolken durch Zugabe von Kondensationskeimen und von Bodenoberflächen durch Änderung der Bodenbedeckung oder gar über die Platzierung von «Sonnenschirmen» oder «Spiegeln» im Weltall nachgedacht. SRM-Massnahmen könnten zum Beispiel dazu dienen, Zeit für Emissionsminderungen zu gewinnen beziehungsweise ein zeitweises «Überschiessen» von Temperaturzielen so lange zu verhindern, bis der Anstieg der CO_2-Konzentration in der Atmosphäre genügend gebremst werden kann. SRM-Massnahmen könnten auch attraktiv erscheinen, weil sie viel rascher wirken als CDR und deshalb bei fortschreitender Klimaerwärmung und entsprechend einschneidenden Auswirkungen kurzfristig Abhilfe schaffen könnten. Zu beachten ist jedoch, dass damit die steigenden Treibhausgaskonzentrationen als Ursache des Klimawandels genauso wenig adressiert werden wie die nicht-temperaturbedingten Folgen des Klimawandels, so etwa die Versauerung der Meere.

In Abbildung 1 und Tabelle 2 sind die beiden Massnahmetypen und ihre wichtigsten Merkmale zusammengestellt. Sie werden auch mit Emissionsminderungsmassnahmen der aktuellen Klimapolitik verglichen. Eine vertiefte Übersicht über die verschiedenen Massnahmen und ihre Charakteristiken (die Angaben sind eine Integration aus verschiedenen Studien und Assessment-Berichten; siehe Literatur) findet sich in den Tabellen 3 (CDR) und 4 (SRM).

Stand der Technik

Zu den SRM-Massnahmen und vielen CDR fehlt oft (noch) das technische Wissen bezüglich Machbarkeit, insbesondere in einer so grossen Dimension, dass eine messbare Wirkung erzielt werden könnte. Im Bereich CDR wird Aufforstung schon seit langem praktiziert und die Herausforderungen sind hinreichend bekannt. Die grössten Probleme liegen hier beim Platzbedarf, der in Konkurrenz zu anderen Nutzungen steht, und bei der Governance, die stark lokal verankert sein muss. Die direkte CO_2-Abscheidung aus der Luft (DACS) ist sehr (energie-) aufwändig, weil das in der Luft hochverdünnte CO_2 separiert und dann in geeignete und sichere geologische Lager gepresst werden muss. Für DACS existieren erst vereinzelte Pilotanlagen und bei der Bioenergieproduktion mit CO_2-Abscheidung (BECCS) eine kommerzielle Anlage. Neben der Entwicklung der Technik(en) bilden die Verfügbarkeit von CO_2-armer Energie oder nachhaltig produzierter Biomasse, die Zuverlässigkeit der geologischen Speicherung sowie hohe Installations- und Betriebskosten potenzielle Hindernisse. Weitere Techniken wie die beschleunigte Mineralisierung oder das Düngen von

1 Im Falle der Ausdünnung von hohen Eis-Wasser-Wolken (sogenannten Zirren; siehe Tabelle 4), die auch diesem Typus zugerechnet wird, handelt es sich nicht um die Reflexion der Sonneneinstrahlung, sondern um die Veränderung der Wärmeabstrahlung.

Ozeanen sind – wenn überhaupt – erst kleinmassstäblich getestet und ihre Wirksamkeit und allfällige Nebenwirkungen sind noch sehr unsicher.

Noch weiter von einer Anwendung entfernt sind sämtliche Ansätze, die im Zusammenhang mit SRM beschrieben werden. Zwar scheint die Injektion von Aerosolen in die Atmosphäre bereits mit heutigen technischen Mitteln möglich, Testexperimente wurden bisher jedoch nur angekündigt, aber noch nicht durchgeführt. Mögliche Nebenwirkungen sind weitgehend unerforscht, wie beispielsweise die Gefahr einer Veränderung der regionalen Niederschlagsverteilung. Eine Vorstellung möglicher Nebenwirkungen von SRM bieten grössere Vulkanausbrüche wie zum Beispiel der Pinatubo 1992 oder Tambora 1815, die mindestens auf der Zeitskala von wenigen Jahren signifikante Veränderungen von Niederschlagsmustern auslösten mit teilweise gravierenden regionalen Auswirkungen.

Hohe Risiken und unbekannte Nebenwirkungen

Die hohen, oft schwer abschätzbaren Risiken und die vielen möglichen unerwünschten Nebenwirkungen bilden ein Haupthindernis für den Einsatz von CDR und vor allem SRM. Klimamodellrechnungen sind dabei für wichtige Themen, wie etwa regionale Niederschlagsverteilungen oder Auswirkungen auf Ökosysteme oft zu wenig aussagekräftig. Von den Wirkungen kleiner Testprojekte kann auch nicht ohne Weiteres auf die Wirkungen entsprechender grösser dimensionierter Projekte geschlossen werden.

Bei CDR liegen die Risiken vor allem in den möglichen lokalen oder regionalen Nebenwirkungen der Massnahmen, zum Beispiel in den Auswirkungen von Vegetationsveränderungen oder dem Land- und Wasserverbrauch (für weitere Auswirkungen siehe auch Tabelle 3). Noch grösser sind Risiken und mögliche Nebenwirkungen bei SRM. Mit SRM wird nicht der gesamte menschengemachte Einfluss auf das Klima gemildert, sondern es entsteht ein neuer menschlicher Eingriff, der zum Beispiel zu neuen, kaum vorhersehbaren Veränderungen der Niederschlagsmuster führt. Eine weitere wichtige Problematik von SRM ist der Umstand, dass die Massnahmen – wenn einmal begonnen – zwingend und mindestens so lange weitergeführt werden müssen, bis die Treibhausgaskonzentrationen durch CDR oder natürlichen Abbau wieder auf das Niveau vor dem Einsatz von SRM gesunken sind. Würde SRM abrupt gestoppt, würde das Klimasystem sehr rasch den wesentlich wärmeren Zustand annehmen, den es ohne SRM-Einsatz aufgrund der höheren atmosphärischen CO_2-Konzentration angenommen hätte. Es käme also zu einer schwierig adaptierbaren schnellen Erwärmung.

Die Crux mit dem Energieverbrauch

Ein fundamentales Problem bei den meisten CDR-Massnahmen ist der Ressourcenverbrauch: Neben Landfläche, Wasser und Dünger (im Falle von biomassebasierten Massnahmen) haben nahezu alle CDR-Ansätze einen oft erheblichen Energieverbrauch, insbesondere für die technische CO_2-Entfernung aus der Luft, die CO_2-Abscheidung bei Bioenergieanlagen und die Zerkleinerung von Gestein für eine erhöhte Verwitterung, aber auch für Aufforstung, die Produktion von Dünger oder die Beschaffung und Verarbeitung von biologischem Material. Wird die benötigte Energie nicht durch CO_2-arme Produktion gewonnen, vermindert sich die Wirkung der jeweiligen Massnahme zum Teil drastisch, da ein Teil des entfernten CO_2 durch den Betrieb der CDR-Massnahme gleich wieder ersetzt wird. Solange ein überwiegender Teil der Energie weltweit noch aus fossilen Quellen gewonnen wird, ist es deshalb meist effizienter, CO_2-arm gewonnene Energie vor allem für die Substitution fossiler Energiequellen zu verwenden und nicht für CDR.

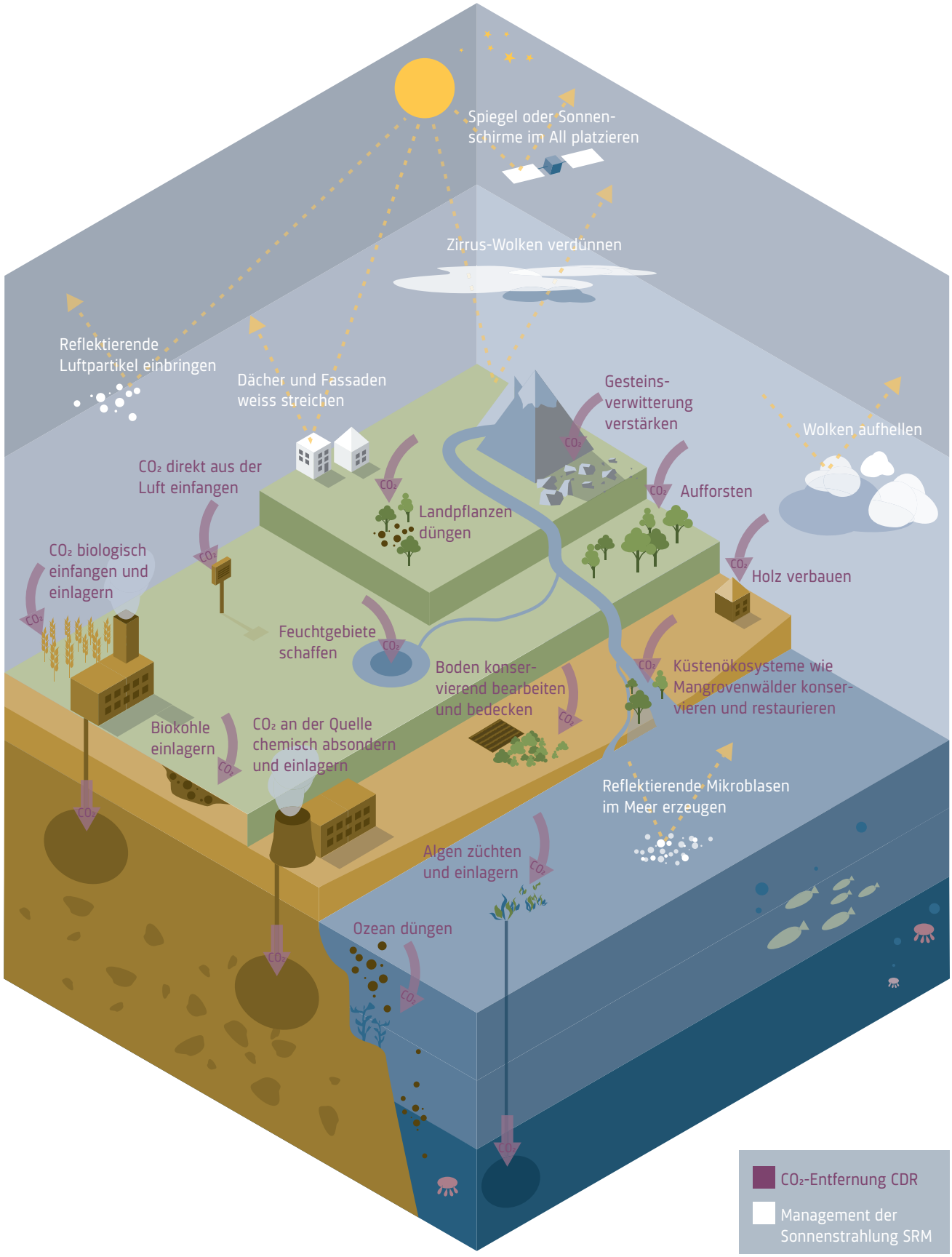
Governance-Herausforderungen und ethische Probleme

Wie soll die Anwendung von CDR und SRM international geregelt werden? Nicht für alle Länder bewirkt eine Verringerung der globalen Temperatur durch SRM ein «günstigeres» Klima. Wer bestimmt die «richtige» Temperatur, die nicht überschritten werden soll? Wie werden Länder, die von negativen Nebenwirkungen einer Massnahme – zum Beispiel von ungünstigen Veränderungen beim Niederschlag – betroffen sind, entschädigt? Wer finanziert die Massnahmen? Wie und durch wen wird die benötigte Technologie armen Ländern zur Verfügung gestellt? Wo und wie soll aus der Atmosphäre entnommenes CO_2 langfristig gelagert werden und unter welchen Bedingungen sind diese Lager für die Bevölkerung akzeptierbar? Die bisherigen Klimaverhandlungen und nationalen Emissionsminderungspläne haben gezeigt, wie schwierig es ist, globale Lösungen für solche Fragen zu finden. Bei der grossangelegten Anwendung der technischen CO_2-Entnahme würden Kosten in einer Höhe anfallen, die globale Verteilungsfragen bisher unbekannten Ausmasses beinhalten. Die Governance von CDR und SRM stellt die globale Staatengemeinschaft deshalb vor ähnliche Herausforderungen wie Minderungsmassnahmen.

Neben Governance-Fragen stellen sich auch ethische oder Gerechtigkeitsfragen. Bei den biologischen CDR wie der Aufforstung oder BECCS kann die Konkurrenz zur Nahrungsmittelproduktion zu einem zentralen ethischen und Gerechtigkeitsproblem werden. Massnahmen mit CO_2-Abscheidung (aus der Atmosphäre oder beim Kraftwerk) konkurrieren sich hinsichtlich der verfügbaren Speichervolumen. Auch diese Konkurrenz führt zu ethischen und Gerechtigkeitsherausforderungen.

Bei SRM stellt sich zudem auch die Generationenfrage: Eine «Symptombekämpfung» durch Verminderung der Sonneneinstrahlung muss von den folgenden Generationen fortlaufend aufrechterhalten werden, ansonsten droht ein im Vergleich zur gegenwärtigen Erwärmung viel schnellerer Temperaturanstieg mit grossen Anpassungsproblemen für Gesellschaft und Ökosysteme. Eine solche «Bürde» für spätere Generationen müsste bei der Beurteilung des Netto-Nutzens von SRM berücksichtigt werden. Darüber hinaus ist die Verteilung der Risiken bei der Anwendung von CDR und SRM ein nicht zu unterschätzendes ethisches Problem mit weitreichenden Gerechtigkeitsimplikationen.

Abbildung 1: Übersicht über die verschiedenen Methoden der CO_2-Entnahme aus der Luft (CDR) und der Beeinflussung der Sonnenstrahlung (SRM).



Braucht es mehr Forschung?

Befürchtungen sind weit verbreitet, dass mehr Aufmerksamkeit für CDR- und SRM-Massnahmen zur Vernachlässigung von Anpassungs- und Emissionsminderungsanstrengungen führen oder grossflächige Tests zur Anwendung von CDR oder SRM animieren könnten, ohne dass die damit verbundenen Risiken genügend bekannt sind beziehungsweise berücksichtigt werden. Beides wird als Argument gegen deren Erforschung angeführt. Trotzdem wird man künftig um die Diskussion des Themas nicht herumkommen. Auf internationaler Ebene wird darüber diskutiert und daran gearbeitet. Mehr Forschung zu CDR und SRM ist deshalb unabdingbar, damit im Falle von konkreten Anwendungsprojekten die entsprechenden Kosten, Risiken und Nebenwirkungen bekannt sind. Dabei sollte es aber nicht nur um Forschung im technischen Sinn gehen, das heisst um Forschung, welche die ökologischen und klimabezogenen Auswirkungen und Nebenwirkungen von CDR und SRM untersucht. Wichtig ist auch, dass diese Forschung begleitet wird durch eine politische, gesellschaftliche und ethische Reflexion der sozialen, gesellschaftlichen und rechtlichen Risiken solcher Massnahmen auf nationaler sowie auf internationaler Ebene. Nicht zu vergessen ist auch, dass bei der gegenwärtigen Entwicklung in der internationalen Klimapolitik sich allenfalls die Frage stellt, ob die Risiken und Folgen einer globalen Erwärmung auf 3, 4 oder 5 Grad Celsius nicht grösser sein könnten als die Risiken zum Beispiel von CDR-Massnahmen.

Tabelle 2: Eigenschaften beziehungsweise Unterschiede von verschiedenen Massnahmetypen.

	Emissionsminderung	CO_2-Entnahme aus der Atmosphäre (CDR)	Beeinflussung der Sonnenstrahlung (SRM)
Ursachen- oder Symptom-bekämpfung	Mindern die Emission von CO_2 (adressieren direkt die Ursache des Klimawandels)	Mindern die CO_2-Konzentration in der Atmosphäre (adressieren die Ursache des Klimawandels)	Erhöhen die Reflexion der Sonnenstrahlung (adressieren nur die Erwärmung als ein Symptom des Klimawandels)
Effekt	Mindern den Anstieg des Treibhauseffekts	Mindern den Anstieg des Treibhauseffekts	Haben eine quasi sofortige Abkühlungswirkung
Risiken	Vermeiden neue globale Klimarisiken	Vermeiden neue globale Klimarisiken. Können positive oder negative Veränderung des regionalen Klimas verursachen	Verursachen möglicherweise neue und zusätzliche globale Klimarisiken
Kosten	Hohe Bandbreite der Kosten	Hohe Bandbreite der Kosten, aber meist deutlich teurer als Emissionsminderung	Hohe Bandbreite der Kosten aber generell eher billiger als CDR
Hürden	Kostenfragen sind wichtig, oft fallen Co-benefits an	Hohe Kosten als Haupthürde, Co-benefits sind möglich	Risiko- und Machbarkeitsfragen stehen im Vordergrund
Governance	Häufig lokal realisierbar. Globale Governance-Fragen betreffend Verpflichtungen und Finanzierung	Primär lokale Governance-Fragen, allenfalls globale Verpflichtungs- und Finanzierungsfragen	Schwierige globale Governance-Fragen zu Verantwortung, Finanzierung und Haftung
Zusammenarbeit	Spürbarer Effekt nur bei weitreichender internationaler Zusammenarbeit	Spürbarer Effekt nur bei weitreichender internationaler Zusammenarbeit	Könnten evtl. auch unilateral durchgeführt werden, dies wäre jedoch konfliktträchtig
Dauerhaftigkeit des Effekts	Massnahmen haben bleibenden Effekt, wenn sie nicht rückgängig gemacht werden	Massnahmen haben bleibenden Effekt, wenn sie nicht rückgängig gemacht werden	Die meisten Massnahmen müssen ständig erneuert werden, sonst Rückfall in Zustand ohne diese Massnahmen, mit schwerwiegenden Folgen
Hauptprobleme	Politische Umsetzbarkeit und Akzeptanz als Hauptprobleme	Hoher Investitionsbedarf, hoher Platzbedarf, Sättigung und Konkurrenz zu anderen Nutzungen als Hauptprobleme	Governance- und Gerechtigkeitsfragen sowie hohe Risiken als Hauptprobleme
Ressourcen-verbrauch	Ressourcenverbrauch durch Massnahmen gering	Vielfach hoher Bedarf an CO_2-armer Energie, oft hoher Bedarf an Land, Wasser oder geologischem Speichervolumen	Energie- und Ressourcenverbrauch eher gering

Fazit

Grundsätzlich gilt es festzuhalten, dass CDR und SRM in keinem Fall Ersatz für die Bemühungen um möglichst rasche und nachhaltige Emissionsminderungen sein können. Diese stehen weiterhin im Vordergrund. Sowohl CDR als erst recht auch SRM können nur als Zusatzmassnahmen dienen, die allenfalls die Anstrengungen zur Emissionsminderung zu ergänzen, um gesellschaftspolitisch erwünschte Ziele zu erreichen.

Ein Einsatz von SRM ist über lokale Anwendungen hinaus aufgrund der grossen Risiken und Ungewissheiten sowie der globalen ethischen und Governance-Fragen bis auf Weiteres zur Bekämpfung des globalen Klimawandels nicht zu verantworten. Der Einsatz von CDR auf kleiner Skala erscheint eher möglich. Der in den meisten Modellszenarien zur Erreichung der Ziele des Übereinkommens von Paris vorausgesetzte grossflächige Einsatz von einzelnen CDR ist hingegen angesichts des sehr begrenzten Wissensstands und den vielen offenen Fragen ebenfalls kaum möglich beziehungsweise wünschenswert. Wissenschaftliche Grundlagen zur Art und Weise des Einsatzes sowie Wirksamkeit, Risiken und Kosten sind notwendig – und sei es für eine robuste Begründung, warum gewisse Optionen **nicht** angewendet werden sollten.

LITERATUR

Boettcher M, Parker A, Schäfer S, Honegger M, Low S, Lawrence MG (2017) **Solar Radiation Management**. IASS Fact Sheet: 2/2017.

EASAC (2018) **Negative emission technologies. What role in meeting Paris Agreement targets?** EASAC policy report 35.

Honegger M, Derwent H, Harrison N, Michaelowa A, Schäfer S (2018) **Carbon Removal and Solar Geoengineering: Potential implications for delivery of the Sustainable Development Goals**. Carnegie Climate Geoengineering Governance Initiative, May 2018, New York, U.S.

IPCC (2013) **Climate Change 2013: The Physical Science Basis (WGI)**. Chapter 6 «Carbon and Other Biogeochemical Cycles». www.ipcc.ch/report/ar5/wg1.

IPCC (2013) **Climate Change 2013: The Physical Science Basis (WGI)**. Chapter 7 «Clouds and Aerosols». www.ipcc.ch/report/ar5/wg1.

IPCC (2014) **Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability (WGII)**. Chapter 7 «Food security and food production systems». www.ipcc.ch/report/ar5/wg2.

IPCC (2014) **Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability (WGII)**. Chapter 19 «Emergent risks and key vulnerabilities». www.ipcc.ch/report/ar5/wg2.

IPCC (2014) **Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change (WGIII)**. Chapter 3 «Social, Economic and Ethical Concepts and Methods». www.ipcc.ch/report/ar5/wg3.

IPCC (2014) **Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change (WGIII)**. Chapter 6 «Assessing Transformation Pathways». www.ipcc.ch/report/ar5/wg3.

IPCC (2014) **Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change (WGIII)**. Chapter 13 «International Cooperation: Agreements and Instruments». www.ipcc.ch/report/ar5/wg3.

Minx JC, Lamb WF, Callaghan MW, Fuss S, Hilaire J, Creutzig F, Amann T, Beringer T, de Oliveira Garcia W, Hartmann J, Khanna T, Lenzi D, Luderer G, Nemet GF, Rogelj J, Smith P, Vicente Vicente JL, Wilcox J, del Mar Zamora Dominguez M (2018) **Negative emissions – Part 1. Research landscape and synthesis**. Environmental Research Letters 13: 063001.

National Research Council. (2015) **Climate Intervention: Carbon Dioxide Removal and Reliable Sequestration**. Washington DC: The National Academies Press.

National Research Council (2015) **Climate Intervention: Reflecting Sunlight to Cool Earth**. Washington DC: The National Academies Press.

Schäfer S, Lawrence M, Stelzer H, Born W, Low S, Aaheim A, Adriázola P, Betz G, Boucher O, Carius A, Devine-Right P, Gullberg AT, Haszeldine S, Haywood J, Houghton K, Ibarrola R, Irvine P, Kristjansson J-E, Lenton T, Link JSA, 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**.

SDGs: Die internationalen Nachhaltigkeitsziele der UNO

In dieser Publikation unterbreitet die Akademien der Wissenschaften Schweiz Informationen zu Massnahmen, die CO_2 aus der Atmosphäre entfernen oder die Erwärmung des Klimasystems durch technische Massnahmen zur Verminderung der Sonneneinstrahlung einzugrenzen versuchen (bekannt als «Geoengineering») sowie der damit verbundenen Risiken. Sie leistet damit einen Beitrag zu SDG 13: **«Umgehend Massnahmen zur Bekämpfung des Klimawandels und seiner Auswirkungen ergreifen.»**



› https://sustainabledevelopment.un.org
› https://www.eda.admin.ch/agenda2030/de/home/agenda-2030/die-17-ziele-fuer-eine-nachhaltige-entwicklung.html

IMPRESSUM

HERAUSGEBERIN UND KONTAKT Akademien der Wissenschaften Schweiz SCNAT | ProClim | Haus der Akademien | Laupenstrasse 7 | Postfach | 3001 Bern | proclim@scnat.ch

REDAKTION Urs Neu

WISSENSCHAFTLICHER BEIRAT Kuratorium ProClim

EXPERTINNEN UND EXPERTEN **Christoph Beuttler**, Stiftung Risiko-Dialog | **Matthias Honegger**, IASS Potsdam | **Jens Leifeld**, Agroscope | **Ulrike Lohmann**, Atmosphäre und Klima, ETH Zürich | **Axel Michaelowa**, Politikwissenschaften, Universität Zürich | **Anthony Patt**, Klimapolitk, ETH Zürich | **Thomas Peter**, Atmosphärenchemie, ETH Zürich | **Gian-Kasper Plattner**, WSL | **Mischa Repmann**, Firstclimate | **Renate Schubert**, Ökonomie und Umweltentscheidungen, ETH Zürich | **Ivo Wallimann-Helmer**, Ethik-Zentrum, Universität Zürich

GRAFIK Sarah Arnold

LAYOUT Sanja Hosi, Olivia Zwygart

TITELBILD Fotolia

ZITIERVORSCHLAG Akademien der Wissenschaften Schweiz (2018) Emissionen rückgängig machen oder die Sonneneinstrahlung beeinflussen: Ist «Geoengineering» sinnvoll, überhaupt machbar und, wenn ja, zu welchem Preis? Swiss Academies Factsheets 13 (4).

Ein Projekt der Akademie der Naturwissenschaften Schweiz (SCNAT)

sc | nat

www.akademien-schweiz.ch/factsheets

ISSN (print): 2297-1580
ISSN (online): 2297-1599

DOI: 10.5281/zenodo.1409025

Drucken wie die Natur drucken würde. Cradle to Cradle™-zertifiziertes und klimaneutrales Faktenblatt gedruckt durch die Vögeli AG in Langnau.

Tabelle 3: Charakteristiken der Massnahmen zur CO_2-Entnahme aus der Atmosphäre (CDR).

CDR Ansatz	Methode / Massnahme (C = Kohlenstoff)	Prozess / Stabilität (C = Kohlenstoff)	Zeitskala Speicherung (Jahre)	Theoret. Potenzial[1]	Positiv bzw. negative Nebenwirkungen sowie Risiken	Kosten pro Tonne CO_2	Technischer Entwicklungs-stand	Ethische und Gerechtigkeitsfragen; Governance
Biologisches Einfangen und Speicherung in Form von Biomasse	**(Wieder-)Aufforstung, verbessertes Forstmanagement**	CO_2-Absorption durch Erhöhung der Biomassenproduktion; reversibel (z. B. Waldbrand, Schädlinge, Abholzung), benötigt ständiges Management	~ 50–500	0,5–10	Evtl. Zunahme Bodenqualität und Wasserrückhaltekapazität; lokale Erwärmung (v. a. hohe Breiten) oder Abkühlung (trockene Standorte); verändert Wasserkreislauf und Biodiversität; wahrsch. höhere N_2O-Emissionen durch Düngung; Konkurrenz zu Nahrungsmittelproduktion	1–100 $; 0,1 ha Land	Techniken sind bekannt und eingesetzt (auch grossflächig)	Evtl. Konkurrenz zu Nahrungsmittelproduktion; Entschädigungen
	Einlagerung von Biokohle im Boden	C-Speicherung durch Einlagerung von Biokohle im Boden; stabil für Jahrzehnte bis Jahrhunderte; begrenzt durch Bodenaufnahmefähigkeit	~ 50–500	0,5–5	Senkt N_2O- und Methan-Emissionen; verringert Dünger- und evtl. Wasserbedarf; erhöht Bodenfruchtbarkeit und landw. Produktion; evtl. mehr Wärmeaufnahme durch dunklere Böden; schlechtere CO_2-Bilanz als Biomasse für Energieproduktion	10–135 $; 0,02–0,1 ha Land	Produktionskapazität sehr beschränkt	
	C-Speicherung im Boden (z. B. konserv. Bodenbearbeitung; Zwischenkulturen)	Erhöhung C-Gehalt im Boden durch günstige Bewirtschaftungsmethoden; reversibel; begrenzt durch Bodenaufnahmefähigkeit	~ 50–500	1,5–10	Erhöht Bodenfruchtbarkeit und landwirtschaftliche Produktion; verbessert Wasser- und Luftqualität; verändert lokale Energiebilanz und Verdunstung an der Erdoberfläche, braucht Dünger	0–80 $	Weitgehend bekannte Techniken	
	C-Speicherung in Holzbauten	C-Speicherung in Pools mit langen Verweilzyklen; reversibel	~ 50–500	?		?	Holz als Baustoff ist bekannt	
	Düngung von Landpflanzen	CO_2-Absorption durch Erhöhung der Biomassenproduktion; reversibel	~ 50–500	?	Verändert lokale Energiebilanz und Verdunstung; wahrscheinlich höhere N_2O- und CO_2-Emissionen (Düngerproduktion)	?	Meist bekannte Techniken	
	Schaffung von Feuchtgebieten	Speicherung von CO_2 in Kohlenstoffpools mit langen Verweilzyklen	~ 500–5000	?	Braucht wenig Fläche für viel C-Speicherung; verändert lokale Energiebilanz und Verdunstung; wahrsch. höhere Methan-Emissionen	?	Bekannte Technik (Vernässung)	Entschädigungen
	Management von Küstenökosystemen («blue carbon»)	Erhöhung CO_2-Gehalt im Küstenökosystem (v. a. Mangrovenwälder) durch günstige Bewirtschaftung	~ 50–500	0,15–0,3		?	Nicht getestet	
Chemisches oder biologisches Einfangen mit dauerhafter geologischer Speicherung	**Biologisches Einfangen von CO_2 mit geologischer Speicherung (BECCS)**	Energieproduktion aus Biomasse (wenn möglich Abfälle) und Abscheiden des entstehenden CO_2; hohe Stabilität in adäquaten Speichern; begrenzt durch verfügbare Biomasse	permanent bzw. > 10 000	0,5–5	Business-Gelegenheiten; ökonomische Diversifizierung; Energie-Unabhängigkeit; Verändert lokale Erwärmung und Verdunstung; Biodiversität und Nahrungsmittelproduktion sinken beim Anbau von Energiepflanzen auf Agrarflächen; Luftverschmutzung bei Verbrennung; N_2O-Emissionen steigen; hoher Energieverbrauch	50-250 $; 0,03-0,1 ha + 60 m^3 Wasser für Energiepflanzen	1 Demoanlage weltweit; grosskalige Machbarkeit fraglich	Konkurrenz zu Nahrungsmittelproduktion, Entschädigungen; langfristiges Speichermanagement
	Direktes Einfangen aus der Luft (v. a. chemisch) (DACS)	Chemische Abscheidung von CO_2 aus der Luft und geologische Einlagerung; hohe Stabilität in adäquaten Speichern	permanent bzw. > 10 000	0,5–10	Business-Gelegenheiten; hohe Kosten und Energieeinsatz (je nach Energiequelle wenig CO_2-Wirkung) sowie Wasserverbrauch	40–1000 $; 3500 kWh; 1–25 m^3 Wasser	Prototypen im Test; technisch wenig ausgereift	Langfristiges Speichermanagement
Verstärkung der CO_2-Aufnahme im Ozean	**Ozean-Düngung mit Eisen, Phosphat oder Stickstoff**	Erhöhung des Planktonwachstums, vermehrtes Absinken und Ablagerung von Plankton am Ozeanboden	~ 500–5000	1–4	Evtl. erhöhter Fischfang; verstärkte Produktion von Biomasse; verstärkte Produktion von nicht-CO_2-THG; evtl. Störung von Meeresökosystemen und Rückgang der Biomasseproduktion in nachgelagerten Gebieten; Versauerung/ Sauerstoffmangel im tiefen Ozean; evtl. toxische Algen; evtl. negative regionale Nebeneffekte für ozeanische Nahrungsmittel	50–500 $	Einige kleinskalige Experimente; kein Konsens zur langfristigen Wirkung	Internationale Kontrolle, Verantwortung; bestehende Abkommen[2]
	Ozean-Düngung durch künstlichen Auftrieb von Tiefenwasser	Erhöhung des Planktonwachstums, vermehrtes Absinken und Ablagerung von Plankton am Ozeanboden; Einlagerung	~ 500–5000	?	Verändert wahrscheinlich den reg. Kohlenstoffkreislauf, was der CO_2-Lagerung entgegenwirkt; kompensierendes Absinken in anderen Regionen; evtl. negative regionale Nebeneffekte für ozean. Nahrungsmittel	?	Nicht getestet	Internationale Kontrolle, Verantwortung; bestehende Abkommen[2]
	Algenzüchtung und Einlagerung	Erhöhung der Biomasseproduktion und Einlagerung	~ 500–5000	?	?	?	Nicht getestet	Internationale Kontrolle, Verantwortung
Verstärkung der Verwitterung	**Zufügung von Silikaten in Böden bzw. Ozean**	Verstärkung der Verwitterung von Silikat- und Karbonatgestein (bindet CO_2) durch Zerkleinerung von Gestein und Verteilung am Boden bzw. im Ozean; stabil	~ 500–5000 für Karbonate, permanent für Silikate	0,5–4	Abnahme des Säuregehalts von Böden und Flüssen bzw. im Ozean; Auswirkungen auf Land-, Süsswasser- und Meeres-Ökosysteme; Freisetzung von Schwermetallen und Pflanzennährstoffen im Boden; hoher Energieeinsatz für Bereitstellung; evtl. negative regionale Nebeneffekte	20 – > 1000 $	Nicht getestet	

[1] Theoretische technische Potenziale in Gigatonnen (= 1'000'000'000 Tonnen) CO_2 pro Jahr. Soziale, ökonomische und gesellschaftliche Aspekte (wie Akzeptanz, Ethik oder Governance) sind dabei nicht berücksichtigt.

[2] Fällt unter die London-Konvention über die Prävention der Meeresverschmutzung durch Deponierung von Abfall und andere Stoffen; Eisendüngung fällt unter die Biodiversitätskonvention (nur bei genügender wiss. Grundlage erlaubt).

Tabelle 4: Charakteristiken der Massnahmen zur Beeinflussung der Sonneneinstrahlung (SRM).

SRM Methode / Massnahme	Prozess	Zeitskala der Wirkung	Aufwand	Nebenwirkungen / Risiken	Kosten pro Tonne CO_2	Technischer Entwicklungsstand	Ethische und Gerechtigkeits-fragen	Governance-Probleme	Gesellschafts-politische Akzeptanz
Spiegel oder Sonnenschirme im All	Reflexion der Sonnenstrahlung durch Spiegel oder Sonnenschirme im All, dadurch Verminderung der Einstrahlung	Lebensdauer der Installationen	Keine Kenntnisse	Abschwächung des globalen Wasserkreislaufs mit regional unterschiedlichen Auswirkungen; evtl. Zunahme der Kohlenstoffaufnahme von Land und Ozean	Hoch	Nicht getestet; unwahrscheinlich, dass in diesem Jahrhundert zur Verfügung	Keine «Exit-Option»; regional ungleiche (Neben-)Wirkungen; Abschiebung der Risiken in Zukunft	Kontrolle, Verantwortung	Unsicher
Injektion von Aerosolen in die Stratosphäre	Einbringen von Luftpartikeln in eine höhere Atmosphärenschicht (15–20 km Höhe), dadurch Verminderung der Sonneneinstrahlung (ähnliche Wirkung wie Vulkane); die Wirkung ist abhängig von Art und Grösse der Partikel; es gibt eine Sättigung – nicht beliebige Kühlung möglich	Wirkt sehr rasch (< 10 Jahre), aber muss ständig erneuert werden (bei Abbruch nach wenigen Jahren wieder im Zustand wie ohne Massnahme)	2–8 Mio. t S pro Jahr für 1 °C Abkühlung	Abbau Ozonschicht in Polarregionen (bzw. Verzögerung der Erholung der Ozonschicht um 30–70 Jahre); Verstärkung Photosyntheseaktivität; Änderung der globlen Niederschlagsmuster; regionale Verstärkung der Ozeanversauerung; bedeutet eine weitere menschengemachte Komponente im Klimasystem mit unbekannten Folgen; bei Abbruch der Massnahme rascher Temperaturanstieg auf das Niveau ohne SRM, mit zahlreichen Anpassungsproblemen	1–10 Mrd. $ für Kühlung von 1–2 W/m^2 (abhängig von der gewählten Diskontierungsrate, der Dynamik der Anwendung oder den Risiken von Nebeneffekten)	Nicht getestet, aber Technologien im Prinzip vorhanden; Vulkanausbrüche können ansatzweise als Analog verwendet werden; für die Abschätzung von Nebeneffekten wären grossräumige Versuche über Jahre bis Jahrzehnte nötig	Multinationale Fragen; keine «Exit-Option»; regional ungleiche (Neben-)Wirkungen; Abschiebung der Risiken auf zukünftige Generationen; Auswirkungen unilateraler Massnahmen; Moral der Kontrollübernahme über die globale Temperatur	Kontrolle (wer kontrolliert? Wer bestimmt die angestrebte Temperatur?); Verantwortung (wer trägt die Verantwortung bzgl. Einsatz, Kosten, Entschädigungen); Internationale Konventionen (z. B. Montreal-Protokoll)	Grosse Skepsis
Aufhellung von Wolken durch Injektion von Kondensationskernen	Einbringen von Meersalz in Wolken über dem Meer (v. a. in Tropen u. Subtropen). Folge sind mehr und kleinere Wassertröpfchen, hellere Wolken und stärkere Reflexion von Sonnenlicht; Sättigungseffekt (Helligkeit der Wolken ist begrenzt)	Wirkt sehr rasch (< 10 Jahre), aber muss ständig erneuert werden (nach Abbruch nach wenigen Tagen wieder im Zustand ohne Massnahme)	100–300 Mio. t trockenes Mehrsalz pro Jahr für 1 °C Abkühlung	Regional unterschiedliche Wirkung; Verändert lokale Energiebilanz und Verdunstung sowie evtl. ozeanische und atmosphärische Strömungen; bedeutet eine weitere menschengemachte Komponente im Klimasystem mit unbekannten Folgen	1–10 Mrd. $ für eine Abkühlung von 1–2 W/m^2	Nicht getestet; einige Erkenntnisse aus Beobachtungen von Schiffsrouten; Die Wirkung der Massnahme ist umstritten, da nur die wenigsten Schiffe den gewünschten Effekt erzielen	Keine «Exit-Option»; regional ungleiche (Neben-)Wirkungen; Abschiebung der Risiken auf Zukunft	Kontrolle, Verantwortung	Unsicher
Aufhellung der Albedo an der Erdoberfläche (in Städten, Landwirtschaft, Wüsten)	Höhere Reflexion der Sonnenstrahlung durch hellere Oberflächen; möglich in Städten, auf Gras- und Landwirtschaftsflächen oder im Ozean (z. B. durch mehr Mikroblasen)	Solange die Massnahme aufrechterhalten wird	Im globalen Massstab unbedeutend, wirkt v. a. regional	Abkühlung v. a. in der Region der Massnahme; evtl. Einfluss auf Niederschlag in Monsun-Regionen	noch nicht geschätzt	Nicht getestet; Modellsimulationen bestätigen den Mechanismus	Keine «Exit-Option»; regional ungleiche (Neben-)Wirkungen; Abschiebung der Risiken auf Zukunft	Kontrolle, Verantwortung	Unsicher
Steigerung der abgehenden Wärmestrahlung durch Modifikation von Zirrus-Wolken	Ausdünnung von hohen Zirrus-Wolken durch Injektion von Eiskernen und damit Abschwächung von deren Treibhauseffekt. Die Wirkung ist umstritten.	Solange die Massnahme aufrechterhalten wird	Unbekannt	Änderungen in Niederschlagsmustern; Abbau der Ozonschicht (mehr UV-Strahlung)	Unbekannt	Bisher nur Theorie	Keine «Exit-Option»; regional ungleiche (Neben-)Wirkungen; Abschiebung der Risiken auf Zukunft	Kontrolle, Verantwortung	Unsicher