

5. DAS STRAHLUNGSMANAGEMENT (Radiation Management, RM)

Der Klimawandel schreitet immer schneller voran. Der Spielraum, die bindenden Klimaschutzziele des Paris-Abkommens zu erreichen, schrumpft mit jedem Tag. Ein schnelleres Handeln ist dringend geboten, um die wachsende Bedrohung unserer Gesundheit und unseres Lebens sowie massive ökonomische Schäden durch die von uns verursachten Klimaänderungen zu vermeiden. Auch deshalb wurden Methoden des Strahlungsmanagements (RM) vorgeschlagen, die direkt in den Strahlungshaushalt unseres Planeten eingreifen sollen. Sie wollen möglichst viel Sonnenstrahlung an der Erde vorbeilenken oder von der Oberfläche zurückreflektieren und aus der Atmosphäre zurückstreuen, z.B. durch Partikel in der hohen Atmosphäre oder hellere Oberflächen und Wolken. Eine Methode zielt darauf ab, auch die Wärmeausstrahlung in den Weltraum durch ausgedünnte Eiswolken zu erhöhen. Die Techniken sind umstritten, da sie nie ohne Nebenwirkungen und Konflikte zu haben sind. Sie sind auch noch nicht im großen Stil einsetzbar, denn es ist noch viel Forschungsarbeit dazu notwendig. Dieses Kapitel versucht in einem Übersichtsbeitrag und vertiefenden Teilkapiteln die RM-Methoden in ihrer unterschiedlichen Effizienz und mit den potenziellen Nebenwirkungen zu beleuchten.

5.1 Das Strahlungsmanagement im Climate Engineering – Ein Überblick

MARKUS QUANTE & THOMAS LEISNER

Climate Engineering Methoden, die in den Strahlungshaushalt und damit in den Energiehaushalt der Erde eingreifen, werden unter dem Begriff Strahlungsmanagement zusammengefasst. Die vorgeschlagenen Verfahren wollen fast alle die einfallende Sonnenstrahlung so umlenken, dass dadurch die Erwärmung an der Erdoberfläche um ein gewisses Maß reduziert wird. Ein Vorschlag betrifft auch die Erhöhung der Wärmestrahlung in den Weltraum. Die potenzielle Wirksamkeit der Methoden ist höchst unterschiedlich. Gemeinsam ist ihnen das Auftreten unerwünschter meteorologischer oder ökologischer Nebenwirkungen. Dieser Beitrag liefert einen ersten Überblick über die Methodenvielfalt, Vertiefungen sind in den nachfolgenden Kapiteln zu finden.

Radiation management in climate engineering - an overview: *Climate engineering methods that intervene in the radiation budget and thus in the energy budget of the earth are subsumed under the term radiation management. The proposed methods almost all rely on redirecting incoming solar radiation in such a way that this reduces the warming at the earth's surface by a certain amount. One proposal also involves increasing outgoing thermal radiation. The potential effectiveness of the methods is highly variable. What they have in common is the possibility for undesirable meteorological or environmental side effects. This contribution provides a first overview of the variety of methods, more detailed information can be found in the following sub-chapters.*

Gestión de la radiación en ingeniería climática - visión general: *Los métodos de ingeniería climática que intervienen en el balance de radiación y, por tanto, en el balance energético de la Tierra se resumen bajo el término de gestión de la radiación. Casi todos los métodos propuestos pretenden redirigir la radiación solar entrante de tal forma que el calentamiento de la superficie terrestre se reduzca en cierta medida. Una de las propuestas consiste también en aumentar la radiación térmica hacia el espacio. La eficacia potencial de los métodos es muy variable. Lo que tienen en común es la aparición de efectos secundarios meteorológicos o ecológicos indeseables. Este artículo ofrece una primera visión general de la variedad de métodos; en los capítulos siguientes encontrará información más detallada.*

In den letzten Jahren wurden neben der drastisch verringerten Emission von Treibhausgasen vermehrt andere Methoden zur Bekämpfung der Klimakrise in die Diskussion gebracht, respektive in Szenarien und Planungen aufgenommen, die unter dem Oberbegriff Climate Engineering (CE) subsumiert werden (siehe Kap. 1.1). Darunter versteht man Methoden, die gezielt und im großen Maßstab in das Klimasystem eingreifen können, um der globalen Erwärmung und ihren Folgen entgegenzuwirken. CE enthält zwei fundamental unterschiedliche Verfahrensstränge, die Kohlendio-

xid-Entnahme (*Carbon Dioxide Removal*, CDR) und das Strahlungsmanagement (*Radiation Management*, RM). Zum RM zählen Methoden, die in den Strahlungshaushalt der Erde eingreifen und entweder die Sonnenstrahlung, die die Erde erreicht und zur Absorption/Erwärmung zur Verfügung steht, reduzieren oder die Wärmestrahlung, die in den Weltraum abgegeben wird, erhöhen. Die Entnahme von Kohlendioxid aus der Atmosphäre greift zwar auch in den Wärmestrahlungshaushalt der Erde ein, diese Art des Climate Engineering wird allerdings nicht zum RM gerechnet.

Ursprünglich umfasste RM lediglich Methoden, die die Sonnenstrahlung ins Visier nahmen, daher fand lange der Begriff Solar Radiation Management (SRM) Verwendung. Mitunter wurde auch von Albedo-Änderung gesprochen. Vor einigen Jahren gab es erstmals den Vorschlag, Zirkuswolken teilweise aufzulösen, mit dem Ziel, die Wärmestrahlung ins Weltall zu erhöhen. Um diese RM-Methode zu integrieren, wird inzwischen übergreifend von Strahlungsmanagement gesprochen.

Im Gegensatz zur Kohlendioxid-Entnahme aus der Atmosphäre, zielt RM nicht auf die primäre Ursache des anthropogenen Klimawandels (die erhöhte atmosphärische CO₂-Konzentration). Es setzt auf die Verschiebung der Balance von absorbierter Sonnenstrahlung und ausgehender Wärmestrahlung, RM will die vom Erdsystem absorbierbare Energie reduzieren und damit dem Temperaturanstieg entgegenwirken. Ein weiterer Unterschied zum CDR liegt in der schnellen Wirksamkeit der meisten RM-Ansätze, die Dämpfung der Erwärmung wird schon nach wenigen Jahren erwartet und nicht erst nach einigen Dekaden. Beiden Verfahrenstypen ist gemein, dass bei der großskaligen Anwendung je nach Methode mit mehr oder weniger ausgeprägten Nebenwirkungen bzw. Zielkonflikten zu rechnen ist, wobei beim RM mit größeren meteorologischen Nebenwirkungen erwartet werden

CDR wird ausführlich in Kap. 2 besprochen. RM wird hier nur in einem ersten Überblick vorgestellt. Die derzeit als wichtig eingeschätzten Methoden werden dann in nachfolgenden Beiträgen tiefergehend beleuchtet. RM wurde auch in Berichten und Übersichtsartikeln in Fachzeitschriften behandelt und mitunter auch bewertet. Hier sind herauszustellen: ROYAL SOCIETY (2009), FEICHTER & LEISNER (2009), LENTON & VAUGHAN (2009), CALDEIRA et al. (2013), NRC (2015), LAWRENCE et al. (2018) und KRAVITZ & KORHONEN (2022).

Der Strahlungshaushalt der Erde

Um die unterschiedlichen Ansatzpunkte der verschiedenen Methoden des Strahlungsmanagements erkennbar zu machen, ist es hilfreich, den Strahlungshaushalt unseres Planeten zu betrachten. Die wichtigste Energiequelle des Erdsystems ist die Sonne, die Energie wird von ihr als elektromagnetische Strahlung hauptsächlich im sichtbaren und infraroten (kurzwelligigen) Spektralbereich der Erde dargeboten. Fast ein Drittel davon (ca. 30%) wird durch die Gase und Partikel (Aerosole) in der Atmosphäre, die Wolken und die Erdoberfläche wieder in den Weltraum zurückgestreut bzw. reflektiert. Den größten Beitrag leisten hierbei die Wolken wegen ihrer oft hohen Rückstreuungsfähigkeit (Albedo) und des

hohen Bedeckungsgrads. Sie haben dadurch einen kühlenden Effekt. An der Erdoberfläche wird nur etwa die Hälfte der ankommenden Sonnenstrahlung absorbiert, da auch ein Fünftel der Energie durch Absorption in der Atmosphäre verbleibt. Die Erde strahlt auch wieder Energie als terrestrische oder Wärmestrahlung ins Weltall zurück. Von der von der Erdoberfläche abgestrahlten Energie entweichen nur etwas weniger als 10% ungehindert in den Weltraum. Treibhausgase und Wolken absorbieren das meiste, wodurch sich die Atmosphäre erwärmt und ihrerseits Richtung Erdoberfläche zurückstrahlt (Gegenstrahlung) und Richtung Weltall abstrahlt. Fast die gesamte Gegenstrahlung wird wiederum am Erdboden absorbiert und erwärmt diesen. Neben den Treibhausgasen sind auch die Wolken wichtige Akteure im langwelligen Strahlungsbereich und tragen zum Treibhauseffekt bei. Langfristig halten sich die insgesamt absorbierte solare Strahlungsenergie und die von der Erde abgegebene terrestrische Strahlung die Waage. Durch menschliche Eingriffe ist das System derzeit geringfügig aus dem Gleichgewicht gebracht worden (um ca. 0,5 bis 1 W m⁻², WILD 2017). Zum Strahlungshaushalt der Erde existieren in Lehrbüchern oder Übersichtsartikeln anschauliche Darstellungen mit quantitativen Angaben (z.B. FOKEN et al. 2021, TRENBERTH 2022, WILD 2017).

RM-Methoden sollen entweder die empfangene Sonnenstrahlung schon außerhalb der Atmosphäre reduzieren, den Anteil der von der Erdoberfläche reflektierten oder in der Atmosphäre zurückgestreuten Strahlung vergrößern oder die langwellige Ausstrahlung erhöhen. Veränderungen einzelner Komponenten des Strahlungshaushalts führen immer zu Nebenwirkungen, da Energieflüsse in komplexe Rückkopplungsprozesse einbezogen sind (TRENBERTH 2022). Beispielsweise werden Niederschläge durch geänderte regionale Zirkulationsmuster umverteilt.

Methoden des Strahlungsmanagements und mögliche unbeabsichtigte Konsequenzen

Für die verschiedenen Eingriffe in den Strahlungshaushalt, mit der Absicht die mittlere globale Temperatur zu senken, wurden unterschiedliche technische Verfahren vorgeschlagen, die in unterschiedlichen Höhenbändern ansetzen (vgl. *Abb. 5.1-1*):

Eingriffe im Weltraum sollen die Sonnenstrahlung mindern, bevor diese die Atmosphäre erreicht. Dafür wurden gigantische Spiegel oder größere Schwärme kleinerer Objekte zwischen Sonne und Erde vorgeschlagen, die einen Teil des Sonnenlichts reflektieren bzw. zurückstreuen oder an der Erde vorbeilenken sollen (Nr. 1 in *Abb. 5.1-1*).

Durch die Erhöhung der Anzahl kleinster Partikel in der Stratosphäre (Atmosphärenschicht zwischen 20 bis 50 km Höhe) ließe sich ein zusätzlicher Teil der in die obere Atmosphäre eingedrungenen solaren Strahlung Richtung Weltall zurückstreuen. Dazu wären geeignete Partikel wie Sulfat-Aerosole, Kalzit u.a. mit unterschiedlichen Vor- und Nachteilen in die Stratosphäre zu injizieren oder dort durch den Eintrag von z.B. SO₂ (ein Gas) zu erzeugen. (Nr. 2 in Abb. 5.1-1; siehe auch Kap. 5.3 und 5.4).

Die Aufhellung von Wolken in der Troposphäre (Atmosphärenschicht vom Erdboden bis in etwa 12 km Höhe) bietet einen weiteren Ansatzpunkt für das solare RM. Durch Hinzufügen geeigneter Substanzen (z.B. Meersalzkristalle) könnte die Albedo von Wolken erhöht und mitunter auch deren Lebenszeit verlängert und damit insgesamt mehr Sonnenstrahlung zurückgestreut werden. Derzeit konzentrieren sich die Vorschläge hierzu auf Stratocumuluswolken über dem Ozean. (Nr. 3 in Abb. 5.1-1; siehe auch Kap. 5.5).

Eine Veränderung von Eiswolken in der oberen Troposphäre sieht der derzeit einzige CE-Vorschlag für den langwelligen Teil des Strahlungshaushalts vor. In geeigneten Zirruswolken (hohe Eiswolken) soll mit speziellen Eiskeimen ein Ausdünnen und dadurch eine Erhöhung der langwelligen Ausstrahlung mit dem Ziel einer Abkühlung erreicht werden (Nr. 7 in Abb. 5.1-1; siehe auch Kap. 5.6).

Zur Erhöhung der Albedo der Erdoberfläche existiert eine Vielzahl von Vorschlägen. Über Land geht es dabei um die Aufhellung von Wüsten durch

riesige, stark reflektierende Folien, hellere Vegetation durch geeignete Pflanzenauswahl oder genetische Veränderungen und auch um hellere Siedlungen (u.a. weiße Dächer). Zur Erhöhung des Anteils der von Ozeanoberflächen in den Weltraum zurückreflektierten Sonnenstrahlung wurde unter anderem vorgeschlagen, langlebige sehr kleine Luftbläschen in der Ozeandeckschicht zu erzeugen. (Nr. 4, 5 u. 6 in Abb. 5.1-1, siehe auch Kap. 5.2).

Allen Methoden des RM ist gemein, dass bei großräumiger Implementierung mit erheblichen, oft nur wenig bekannten Nebenwirkungen zu rechnen ist. Fast alle versuchen, die durch anthropogene Treibhausgasemissionen über einen langwelligen Strahlungseffekt bewirkte globale Erwärmung durch Maßnahmen im Kurzwelligen zu kompensieren. Es wird also nicht die primäre Ursache angegangen, sondern es soll einem Symptom – der erhöhten globalen Mitteltemperatur – entgegengewirkt werden. RM kann ein früheres Klima mit seinen regionalen Ausprägungen nicht »einstellen«, auch wenn es gelingen sollte, die frühere globale Mitteltemperatur wieder zu erreichen (siehe z.B. ROYAL SOCIETY 2009). Es würde sich ein neues Klima einstellen. Auch bei relativ gleichmäßiger Verteilung der Reduktion der Einstrahlung, wie z.B. mit Weltraumspiegeln oder einer verstärkten Aerosolschicht, würde es zu einem Gradienten in der Temperaturantwort kommen. Die Tropen würden stärker abkühlen als die hohen Breiten (NRC 2015, LAWRENCE et al. 2018). Sollte die gesamte Temperaturerhöhung kompensiert werden, nähme der Niederschlag insgesamt ab (z.B. BALA et al. 2008).

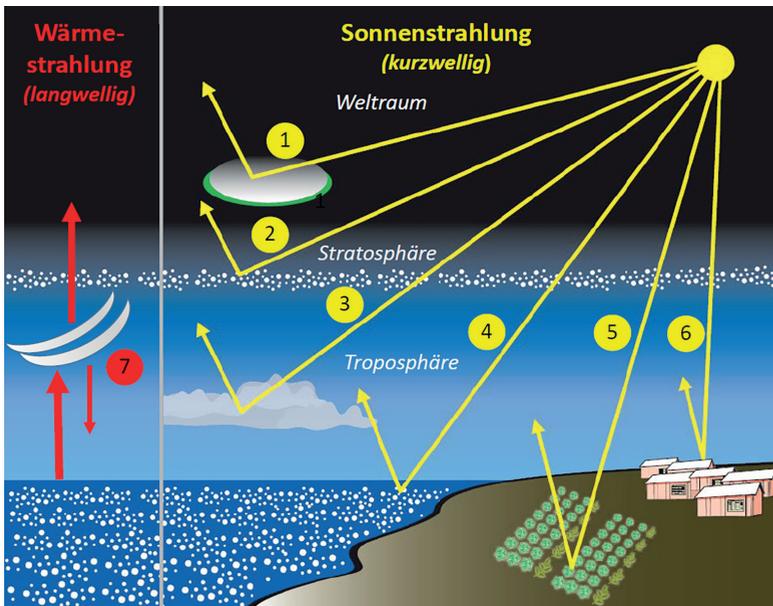


Abb. 5.1-1: Skizze der vorgeschlagenen technischen Eingriffe in die Strahlungsbilanz der Erde um die globale (regionale) Temperatur zu senken. (1) Spiegel im Weltraum, (2) Stratosphärischer Aerosoleintrag, (3) Aufhellung von Wasserwolken, (4) Aufhellung der Ozeanoberfläche, (5) höhere Albedo von Landoberflächen/Vegetation, (6) weiße Dächer und hellere Siedlungen, (7) Ausdünnung von Zirruswolken (eigene Abbildung, basierend auf CALDEIRA et al. 2013).

Einige Methoden wirken regional begrenzt (z.B. Stratocumulusfelder, Wüsten, Siedlungen). Der Kühleffekt ist dadurch regional deutlich stärker, was Zirkulationsmuster ändert und damit die Niederschlagsverteilung und/oder Windverhältnisse auch in entfernten Regionen (sog. Telekonnektionen). Ein veränderter Wasserkreislauf würde das Risiko von großräumigen Dürren und Trinkwasserknappheit erhöhen (TRENBERTH 2022).

RM wirkt vergleichsweise rasch (Monate bis wenige Jahre). Dies würde den Einsatz im Falle eines hypothetischen »Klimanotstandes« nahelegen. Aber ein plötzlicher Abbruch einer RM-Maßnahme führte wieder zu einer schnellen Erwärmung, also zu einem Klimaschock. Insbesondere dann, wenn in der Zwischenzeit nicht erhebliche Mengen an Kohlendioxid der Atmosphäre entnommen worden sind (NRC 2015). Wenn sich die Weltgemeinschaft für den Einsatz einer RM-Methode entscheidet, ohne parallel die Treibhausgasemissionen zu reduzieren und CO₂ aus der Atmosphäre zu entfernen, erhöht sie das Risiko stark. Der „Schutzschirm“ müsste dauerhaft sein und ggf. im Laufe der Jahre verstärkt werden. *Abb. 5.1-2* zeigt ein solches Szenario, in dem mehrere Klimamodelle die sich einstellende Erwärmung für um 1% pro Jahr erhöhte CO₂-Konzentrationen sowie für eine zusätzliche SRM-Maßnahme berechneten. Nach 50 Jahren wurde das solare Climate Engineering dann abrupt ausgesetzt, mit dem Ergebnis eines sehr raschen Temperaturanstiegs in den darauffolgenden Jahren.

In den nachfolgenden Abschnitten werden einzelne Technologievorschlage etwas ausführlicher auch mit den noch existierenden Unsicherheiten und spezifischen Nebenwirkungen besprochen.

Weltraumbasierte Methoden

Nach Klimamodell-Abschätzungen würde eine um ca. 2% geringere Sonnenstrahlung die globale Erwärmung bei Verdoppelung des CO₂-Gehaltes der Atmosphäre kompensieren können (ROYAL SOCIETY 2009). Bewirkt werden könnte dies durch im Weltraum platzierte Staubwolken, Reflektoren oder Refraktoren. So wurden z.B. saturnahnliche Ringe aus Weltraumstaub (PEARSON et al. 2006), ein gigantisches, transparentes Prisma aus glasartigem Mondmaterial (EARLY 1989) oder ein metallischer Streukörper (TELLER et al. 1997) angedacht. Die Objekte sollen in einem erdnahen Orbit oder am Lagrangepunkt L1 positioniert werden. L1 ist der Ort, an dem die Gravitationskraft von Sonne und Erde gleich groß ist. Er liegt in etwa 1,5 Millionen Kilometer von der Erde in Richtung Sonne. Objekte bei L1 schwächen die Einstrahlung auf der Erde rund um die Uhr, da sie auf der Achse Sonne-Erde bleiben. Auch ANGEL (2006) sieht in seinem Konzept den L1 vor, an dem ein riesiger Schwarm (Billionen) kleiner, für optimale Beugung designter Kreisscheiben (»Flyer«) zu positionieren wäre.

Eine umfassende Übersicht zu allen Methodenvorschlagen ist bei MCINNES et al. (2014) und BAUM et

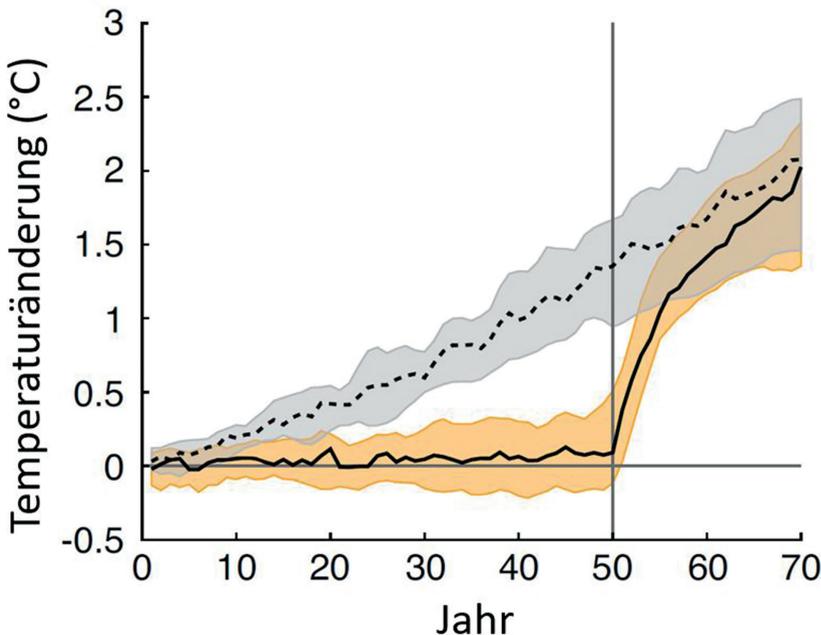


Abb. 5.1-2: Temperaturänderungen in idealisierten Simulationen zum SRM. Die durchgezogene Kurve zeigt die Ergebnisse im strahlungsreduzierten Klima die gestrichelte ohne SRM. Im Jahr 50 nach dem Start wurde die SRM-Maßnahme abgebrochen. Die farbige hinterlegten Bereiche zeigen die Streuung (25% und 75%-Perzentile) der Modellergebnisse (nach IPCC 2013).

al. (2022) zu finden. Die technischen, materiellen und finanziellen Herausforderungen für diese weltraumgestützten RM-Methoden wären enorm. Aktuelle Assessments zum Climate Engineering erwähnen sie kaum noch.

Aufhellung der Erdoberfläche

Von der gesamten, die Erde treffenden Sonnenstrahlung werden nur etwa 7% von der Erdoberfläche in den Weltraum zurückreflektiert, von der die Erdoberfläche erreichenden Sonnenstrahlung sind es etwa 13% (WILD 2017). Die Albedo (relative Rückstreuungsfähigkeit für Sonnenlicht) eines Ortes hängt sehr stark von der Oberflächenbeschaffenheit und auch dem Einfallswinkel der Sonnenstrahlung ab. Typische Werte sind: Wasserflächen 3-10%, Ackerland 7-10%, Grassland 14-25%, Wälder 15-18%, Wüstensand 30-45% und Siedlungen 12-20%. Ozeane sind aufgrund ihrer großen Fläche maßgeblich für die genannte mittlere Albedo der Erdoberfläche.

Bewusste Veränderungen der Oberfläche können die Albedo erhöhen und damit die absorbierte Sonnenenergie mindern. Die Aufhellung von Oberflächen als CE-Maßnahme wird hier nur kurz umrissen, mehr dazu enthält Kap. 5.2.

Erhöhung der Ozeanalbedo

Vorgeschlagene Maßnahmen dazu sind: Erzeugung von Mikrobläschen oder persistentem Schaum, die Erhöhung der Meereisalbedo, hellere Algenblüten (Coccolithophoriden) oder reflektierendes Material an der Oberfläche. Eine Übersicht der Methoden und zu ihren Potenzialen, Unsicherheiten und Risiken liefert der GESAMP-Bericht (GESAMP 2019).

Reflektierendes Material - Schon im Jahr 1965 wurde in einem Bericht an den damaligen U.S.-Präsidenten Lyndon B. Johnson vorgeschlagen, sehr kleine, hochreflektierende und schwimmfähige Partikel großflächig auf den Ozeanen zu nicht exorbitanten Kosten auszubringen (PSAC 1965). In den letzten Jahren wurde diese CE-Methode unter anderem wegen der Nachteile für die Fischerei und der aktuellen Plastikverschmutzung nicht mehr ernsthaft vorgetragen. FIELD et al. (2018) schlagen eine Methode zur Erhöhung der – allerdings ohnehin schon hohen - Albedo des Arktischen Meereises durch hochreflektives Material, wie z.B. hohle, schwimmfähige Glaskügelchen, vor.

Luftbläschen (Microbubbles) - Ein noch relativ neuer Vorschlag zur Erhöhung der Meeressalbedo sieht die Erzeugung von sehr kleinen Luftbläschen als Streuobjekte direkt unter der Oberfläche vor, die dort längere Zeit verweilen (SEITZ 2011). Ob so kleine Luftbläschen

mit langer Lebenszeit erzeugt werden können, hängt sehr stark von natürlichen oder eingebrachten oberflächenaktiven Substanzen ab. So sollen die Luftbläschen in der Nachlaufströmung von Schiffen in einen breiteren und länger überlebenden Blasenteppich überführt werden (CROOK et al. 2016). Die noch fehlende Forschung muss auch die Auswirkungen auf die Ökosysteme und biogeochemischen Kreisläufe im Ozean untersuchen.

Aufhellung von Landoberflächen

Publizierte CE-Methoden zur Erhöhung der Albedo von Landoberflächen existieren hauptsächlich für Wüstenflächen, Vegetationstypen und Städte.

Wüsten – Wüsten (ca. 2,3% der Erdoberfläche) sind Gebiete mit geringer Vegetation und hoher Einstrahlung, was sie für eine Albedoerhöhung prädestiniert. Schon früh sind Vorschläge zur Bedeckung sehr großer Wüstenflächen mit hochreflektierenden, polyethylenbeschichteten Aluminiumfolien erschienen. Wären alle Wüsten mit Folien bedeckt, könnte eine nennenswerte Erhöhung der Albedo des Planeten erreicht werden (LENTON & VAUGHAN 2009), aber die Kosten wären immens (ROYAL SOCIETY 2009). Das Ökosystem Wüste wäre generell bedroht und auch der Wasserkreislauf in angrenzenden Gebieten verändert.

Vegetation – Methoden zur Erhöhung der Albedo der Vegetation sind: Bepflanzung von Savannen und Buschland mit helleren Sträuchern oder Gräsern (HAMWAY 2007). Durch eine gezielte Auswahl von Nutzpflanzen könnte Agrarland aufgehellt werden (RIDGEWELL et al. 2009). Auch gentechnisch modifizierte hellere Pflanzen sind in der Diskussion (HAMWAY 2007, RIDGEWELL et al. 2009). Bei relativ geringen Forschungs- und Entwicklungskosten werden diese Maßnahmen als risikoreich eingeschätzt, weil die Biodiversität empfindlich beeinträchtigt werden könnte (ROYAL SOCIETY 2009). Das Kühlpotenzial der Maßnahmen wird im globalen Maßstab als gering angesehen (LENTON & VAUGHAN 2009).

Weißer Städte – Die Erhöhung der Albedo von Städten und Siedlungen (etwa 1% der Erdoberfläche) durch weiße Dächer und hellere Straßen- und Parkplatzbeläge wird als weitere Möglichkeit zur Kühlung der Erdoberfläche ins Spiel gebracht (AKBARI et al. 2012). Trotz verfügbarer Techniken werden die Kosten als sehr hoch eingestuft. Der Methode der weißen Dächer wird kein nennenswertes Potenzial im Kampf gegen den Klimawandel zuerkannt (Royal Society 2009, Lenton und Vaughan 2009). Regional spielt diese Methode bei der Klimaanpassung jedoch schon heute eine Rolle (SENEVIRATNE et al. 2018).

Stratosphärischer Aerosoleintrag (Stratospheric Aerosol Injection, SAI)

Aerosole sind in der Erdatmosphäre omnipräsent. Ihre Quellen sind vielfältig, sie werden natürlich eingetragen und über Windsysteme weit verteilt. Ein großer Teil von ihnen wird auch durch uns Menschen auf unterschiedlichste Art in die Atmosphäre emittiert. Der weitaus überwiegende Teil des atmosphärischen Aerosols befindet sich in der Troposphäre. Aerosole wechselwirken intensiv mit der kurzwelligen Strahlung, sie streuen einen Teil der auf sie treffenden Sonnenstrahlung zurück in den Weltraum und absorbieren einen mehr oder weniger großen Anteil. Sulfatpartikel sind zum Beispiel gute Streuer, die kohlenstoffreichen Rußpartikel sind gute Absorber. Insgesamt hat das atmosphärische Aerosol netto einen kühlenden Effekt (BELLOUIN & YU 2022).

Auf natürlichem Weg gelangen größere Mengen an Aerosolen oder ihrer Vorläufergase durch starke Vulkanausbrüche in die Stratosphäre, als wichtiges Beispiel seien hier das Gas Schwefeldioxid (SO_2) und das Sulfataerosol genannt. Der Ausbruch des Mount Pinatubo auf den Philippinen im Jahr 1991 gehört zu den gut erforschten. Im Folgejahr fiel die globale Temperatur um etwa $0,5^\circ\text{C}$ und hatte Auswirkungen auf die Niederschlagsverteilung (KRAVITZ & KORHONEN 2022). Vulkanausbrüche fungieren als ein (nicht perfektes) Analogon für die CE-Methode SAI (siehe Kap. 5.3).

Zur Abkühlung des Klimas hat der russische Klimatologe Michail Budyko schon 1974 den Eintrag von Schwefelaerosolen in die Stratosphäre vorgeschlagen (siehe Kap. 1.3). Ernsthaftige Aufmerksamkeit in der wissenschaftlichen Gemeinschaft erreichte SAI erst viele Jahre später wieder durch einen weit beachteten Artikel des Nobelpreisträgers Paul Crutzen zum Climate Engineering (CRUTZEN 2006).

Das Forschungsinteresse zum SAI konzentrierte sich bisher auf die Idee, gasförmiges SO_2 in eine Höhe von 20 bis 25 km einzubringen, wo es dann langsam zum Sulfataerosol umgewandelt und global verteilt würde. Es werden aber auch andere gasförmige (z.B. Schwefelwasserstoff und Carbonyl) und auch partikelförmige Ausbringungsmaterialien diskutiert (z.B. Kalzit, Siliziumcarbid, Aluminit, Titandioxid, Zirkoniumdioxid oder Diamantstaub) (LAWRENCE et al. 2018, WMO 2022). Bei gasförmigen Ausbringungssubstanzen trifft der Begriff „Stratospheric Aerosol Injection“ den Sachverhalt nicht ganz korrekt, das Aerosol wird in der Stratosphäre aus dem Gas gebildet, daher wird in dem Fall auch von „Stratospheric Aerosol Intervention“ gesprochen. Der erstere Begriff scheint jedoch der etablierte zu sein (WMO 2022). Zur Ausbringung des Materials gab es eine Reihe von Vorschlägen, Ballone

sind im Gespräch (CRUTZEN 2006), aber natürlich auch hochfliegende Spezialflugzeuge (SMITH et al. 2022).

Bei der Menge des einzutragenden Schwefels, um bestimmte Temperaturabsenkungen zu erzeugen, gibt es noch keine Übereinstimmung zwischen den verfügbaren Studien. Größere Mengen an SO_2 wären nötig, wenn die Aerosol-Partikel koagulieren und dadurch weniger effektiv streuen und schneller ausfallen (NIEMEIER & TIMMRECK 2015). SAI gilt im Vergleich zu drastischen Mitigationsanstrengungen als sehr preiswert, sodass sogar ein unilateraler Einsatz möglich wäre (ROYAL SOCIETY 2009). Da die eingebrachten Partikel nach relativ kurzer Zeit wieder ausfallen, müssten diese immer wieder nachgeliefert werden, wobei die Mengen bei weiter steigenden CO_2 -Konzentrationen entsprechend aufgestockt werden müssten.

Der Effekt, den SAI auf das Klimasystem und damit auf die Temperaturverteilung hätte, ist derzeit nur über Modellstudien erfassbar (siehe Kap. 5.4). Die Modellstudien zeigen, dass sich über den Schwefeleintrag die globale mittlere Temperatur absenken ließe. Zum Umfang, Zeitpunkt und Ort der Kühlung sind sie sich aber nicht einig. Details hängen auch vom Experimentdesign ab, insbesondere von der Eintragsmenge und -höhe sowie der geographischen Breite des Eintrags.

Studien weisen auch auf deutliche Nebenwirkungen eines Schwefeleintrags in der Stratosphäre hin. Diese würde sich aufgrund von Absorption langwelliger Strahlung durch die Partikel erwärmen. Auch Zirkulationsänderungen in der Troposphäre wären möglich, mit weiteren Auswirkungen auf den Wasserkreislauf bis hin zur Verschiebung von Niederschlagsgürteln (ROYAL SOCIETY 2009). Ein sehr wichtiger Nebeneffekt des SAI betrifft mögliche Auswirkungen auf die Ozonschicht (WMO 2022).

Das Einbringen von Aerosolen in die Stratosphäre zur Abkühlung des Klimas ist wohl die am besten untersuchte und bekannteste Methode des Strahlungsmanagements. Einen umfassenden Einblick geben NRC (2015), Kravitz und Korhonen (2022) sowie das Kap. 5.4.

Marine Wolkenaufhellung (Marine Cloud Brightening, MCB)

Die stark kühlende Wirkung der Wasserwolken in der unteren Troposphäre, legt eine Eignung zur Klimabeeinflussung nahe. Weil das Rückstreuvermögen eines einzelnen Wolkentröpfchens proportional zu seiner Oberfläche ist und bei gegebenem Flüssigwassergehalt eine Wolke mit vielen kleineren Tröpfchen mehr zurückstret (TWOMEY 1977), könnten in Regionen mit wenigen Wolkenkondensationskeimen (engl. cloud condensation nuclei, CCN) solche eingebracht werden,

um hellere Wolken zu erzeugen. Sehr augenfällige Beispiele für diesen Twomey-Effekt sind die gelegentlich in Satellitenbildern sichtbaren „Schiffsfahnen“, (engl. ship tracks). Hier verzieren linienförmige hellere Wolken die Routen von Schiffen, die die Luft über ihnen mit Kondensationskeimen angereichert haben (vgl. Abb. 5.5-3 in Kap. 5.5).

Insbesondere wasserlösliche Aerosolpartikel wie zum Beispiel Seesalz-Aerosole sind die wichtigsten CCN. Durch Erhöhung der Anzahl dieser Kondensationskeime könnten Wolken dort aufgehellt werden, wo die natürliche Konzentration der CCN gering ist, wie in den Reinluftgebieten über den Ozeanen. John Latham schätzte 1990 erstmals ab, dass jährlich einige hunderttausend Tonnen von Seesalz-Aerosolen über den Meeren ausgebracht werden müssten, um die Wolkenhelligkeit merklich zu erhöhen und so eine Abkühlung herbeizuführen, die den anthropogenen Treibhauseffekt kompensieren könnte (LATHAM 1990). Nicht alle Teile des Ozeans reagieren gleichermaßen empfindlich auf eine CCN Zugabe, man könnte sich daher auf die sensibelsten Regionen beschränken. Diese liegen in mittleren und niedrigen Breiten jeweils westlich der großen Kontinente und umfassen weniger als 10% der gesamten Ozeanfläche.

Die benötigte Menge von zusätzlichem Seesalz-Aerosol scheint hoch, sie ist jedoch nur ein kleiner Bruchteil der natürlich emittierten Seesalzmenge. Es gibt für die Ausbringung einen Vorschlag (SALTER et al. 2008), der auf eine Flotte von mehreren tausend ferngesteuerten und windangetriebenen Schiffen setzt. Die größte technologische Hürde ist dabei die verlässliche Erzeugung von sehr kleinen Salzpartikeln; zu große Partikel können auch als Niederschlagskeime wirken und so einen gegenteiligen Effekt auslösen.



Abb. 5.1-3: Geschlossenzellige und offenzellige Stratocumulus-Bewölkung am 25. August 2022 über dem Pazifik westlich von Chile (Joshua Stevens, NASA Earth Observatory).

Viele Fragen müssen allerdings noch geklärt werden, wie Größe und Anzahl der zusätzlichen Keime, die den natürlich vorkommenden Partikeln angepasst werden sollten (HOFFMANN & FEINGOLD 2021). Die Helligkeit der Wolken hängt auch von ihrer kleinskaligen Struktur ab. In sogenannter offenzelliger Bewölkung beranden Wolken die flächig ausgedehnten wolkenfreien Gebiete, bei geschlossenzelliger Bewölkung verhält es sich gerade umgekehrt (Abb. 5.1-3). Durch das Ausbringen von Seesalz-Partikeln kann dieser Wolkentyp auch in einiger Entfernung vom emittierenden Schiff umschlagen. Das wäre beim Übergang von offenzelliger zu geschlossenzelliger Bewölkung erwünscht, im umgekehrten Fall kontraproduktiv. Derartige komplexe Wechselwirkungen zwischen Wolkenimpfen und solarer Einstrahlung werden in globalen Klimamodellen nicht dargestellt, sondern müssen mit aufwändigen »Large Eddy Simulationen« behandelt werden, welche wiederum in ihrer räumlichen und zeitlichen Abdeckung begrenzt sind. Verlässliche Informationen über das Potential des MCB ließe sich daher wohl nur über ausgedehnte Beobachtungsprogramme erhalten. Die Wirksamkeit der Beeinflussung der Wolkenalbedo zur Abkühlung des Klimas ist aufgrund dieser komplexen atmosphärischen Prozesse derzeit nicht verlässlich zu quantifizieren. Einen guten Überblick über den Kenntnisstand geben NRC (2015), Kravitz und Korhonen (2022) sowie das Kap. 5.5.

Zirrusausdünnung (Cirrus Cloud Thinning, CCT)

Hoch liegende Eiswolken (Zirren) in der Nähe der Tropopause haben im Mittel einen erwärmenden Einfluss, weil sie die Abstrahlung von der Erdoberfläche und der unteren Atmosphäre ins Weltall teilweise oder ganz blockieren und ihre eigene Abstrahlung wegen ihrer sehr niedrigen Temperatur gering ausfällt. Auch streuen sie das einfallende Sonnenlicht weniger zurück als tiefer liegende Wolken und wirken damit weniger kühlend. Deshalb diskutierten D.L. MITCHELL und W. FINNEGAN 2009 erstmals die Möglichkeit, das Ausdünnen der Zirrusbewölkung zur Klimakontrolle einzusetzen (MITCHELL & FINNEGAN 2009). Zusätzliche Eiskeime (z.B. Mineralstaub) in der oberen Troposphäre sollen zu einem schnelleren Anwachsen der dann weniger Eispartikel und damit zu einem schnelleren Absinken und Auflösen der Zirren führen. STORELMVO et al. (2014) erkannten, dass eine Beschränkung der Methode auf die Polargebiete und dort auf die Wintermonate das Verfahren besonders effektiv und nebenwirkungsarm machen könnte. Ein Teil der nachfolgenden Untersuchungen konnten das hohe Potenzial von CCT jedoch nicht bestätigen, so dass die Wirksamkeit der

Methode bis heute nicht abschließend bewertet werden kann. Weitere Einzelheiten sind z.B. in NRC (2015), bei LOHMANN & GASPARINI (2017) sowie im Kap. 5.6 zu finden. Dort werden auch die wolkenphysikalischen Aspekte des Verfahrens beleuchtet.

CCT nimmt unter den Vorschlägen zum RM aus mehreren Gründen eine Sonderstellung ein:

Es setzt konzeptionell näher an der Ursache des Klimawandels – der Absorption durch Treibhausgase – an als SRM und könnte deswegen weniger meteorologische Nebenwirkungen haben. Allerdings würde auch hier die raumzeitliche Verteilung der Maßnahmen nicht mit der Wirkung der Treibhausgase zusammenfallen. Die Masse der notwendigen Eiskeime wäre verglichen mit anderen Methoden der Wolkenbeeinflussung extrem gering, die Methode wäre also einfach und kostengünstig umzusetzen.

Während des Polarwinters ohne Sonne haben Eiskernen kaum einen kühlenden Einfluss im kurzwelligen Spektralbereich, verhindern aber die Abkühlung der Oberfläche durch die Blockade der Wärmestrahlung. Daher bietet sich hier CCT besonders an.

So würde CCT die besonders stark vom Klimawandel betroffene Arktis kühlen, in welcher mögliche Kippelemente des Klimasystems, wie das Grönländische Eisschild oder der sibirische Permafrost liegen. Eine geringere Erwärmung der Arktis hätte auch eine – gewünschte – Wirkung auf das Meereseis. Es dehnte sich im Winter weiter aus und wirkte im Frühjahr und Sommer durch seine hohe Albedo gegen die Erderwärmung, dann, wenn die CCT-Maßnahme selbst nicht mehr angewandt wird.

CCT ist unter den Aerosol- und Wolken-basierten Ansätzen der Klimakontrolle bislang am wenigsten erforscht, auch weil Zirren im Polarwinter schwer zu beobachten sind und die mikrophysikalischen Vorgänge wesentlich komplexer sind als bei Flüssigwasserwolken. Erste realistischere Simulationen (GRUBER et al. 2019) deuten darauf hin, dass auch Zirren an Orten entstehen können, die ansonsten zirrusfrei geblieben wären und dass die eingebrachten Eiskeime auch tiefer liegende arktische Schichtwolken beeinflussen können. Für CCT gibt es bislang keine abschließende, wissenschaftlich fundierte Bewertung. Und es existieren ungeklärte politische und rechtliche Fragen. Mehr zum CCT im Kap. 5.6.

Fazit

Alle Methoden des Strahlungsmanagements haben prinzipiell das Potenzial zur Abkühlung des Klimasystems, allerdings mit deutlich unterschiedlicher Wirksamkeit. Einige der Methoden lassen sich nur regional begrenzt einsetzen (MCB, CCT, Oberflächenaufhellung), dadurch sind meteorologische Nebenwirkungen wie deut-

liche Veränderungen in regionalen Zirkulationsmustern mit Auswirkungen auf die Niederschlagsverteilung wahrscheinlich. Es sind auch erhebliche Auswirkungen auf terrestrische bzw. marine Ökosysteme zu erwarten (ZARNETZKE et al. 2021).

Keine der Methoden des RM ist derzeit in einem Zustand, großskalig eingesetzt werden zu können. Die weltraumbasierten Methoden stehen vor enormen technischen Herausforderungen und sind auch finanziell sehr fordernd, sie gelten als utopisch. Die Methoden zur Erhöhung der Oberflächenalbedo sind in ihrer Wirksamkeit eher auf die lokale Skala beschränkt, einige von ihnen können jedoch im Bereich der Klimaanpassung eine Rolle spielen (SENEVIRATNE et al. 2018). Bei der Aufhellung von Wasserwolken und der Ausdünnung von Zirren gibt es noch viele wissenschaftlich ungeklärte Fragen, die bis dahin gehen, ob sich bei falscher Implementierung der gegenteilige Effekt zur erwünschten Abkühlung einstellen könnte. Gegenwärtig scheint der Vorschlag zum stratosphärischen Aerosoleintrag am weitesten fortgeschritten zu sein. Aber auch hier sind noch nicht alle technischen Fragen geklärt. Insgesamt sind viele Wirkzusammenhänge und Nebenwirkungen nicht ausreichend bekannt, Überraschungen sind vorprogrammiert.

Da es berechtigten Widerstand gegen großskalige Realexperimente gibt, beruhen die meisten Erkenntnisse zur Klimawirksamkeit und Nebenwirkungen der RM-Methoden auf Studien mit Erdsystemmodellen, in denen relevante physikalische Prozesse nur durch unbefriedigende Annäherungen (FEICHTER & QUANTE 2017) und ökosystemare Ansätze so gut wie gar nicht implementiert sind.

Die Wirksamkeit des RM kann erst viele Jahre nach der Implementierung nachgewiesen werden. Es könnte zwischenzeitlich ein falsches Gefühl der Sicherheit aufkommen. Zudem kann niemand ein funktionierendes, sich über viel Dekaden erstreckendes Strahlungsmanagement-Programm garantieren. Wenn es zusammenbricht wird der aufgeschobene Klimawandel in wenigen Jahren schockartig nachgeholt. Zudem würde bei einem weiteren Anstieg der CO₂-Konzentrationen die Versauerung der Ozeane fortschreiten.

Wichtige, noch weitestgehend ungelöste Fragen für jede Form des Strahlungsmanagements betreffen die politische und juristische Ebene (Völkerrecht, Haftungsfragen). Diese Aspekte werden im Kap. 6 dieses Buches behandelt. Es bleibt zu hoffen, dass die Emissionsminderung erfolgreich ist und dadurch insbesondere massive Eingriffe ins Klimasystem, wie es einige Methoden des Strahlungsmanagements bedeuteten, nicht notwendig sind und die Notbremse nicht gezogen werden muss.

Literatur

- AKBARI, H., H. DAMON MATTHEWS & D. SETO (2012): The long-term effect of increasing the albedo of urban areas. *Environmental Research Letters* 7(2).
- ANGEL, R. (2006): Feasibility of cooling the Earth with a cloud of small spacecraft near the inner Lagrange point (L1). *Proc Natl Acad Sci*, Vol. 103, No. 46, 17184-17189.
- BALA G., P. B. DUFFY & K. E. TAYLOR (2008): Impact of geoengineering schemes on the global hydrological cycle. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 105:7664-69.
- BAUM, C.M., S. LOW & B. K. SOVACOOOL (2022): Between the sun and us: expert perceptions on the innovation, policy, and deep uncertainties of space-based solar geoengineering. *Renewable Sustainable Energy Rev.*, 158, 112179.
- BELLOUIN, N. & H. YU (2022): Aerosol-radiation interactions. In K.S. CARSLAW (Hrsg.), *Aerosols and Climate*. Elsevier, 445-487.
- CALDEIRA, K., G. BALA & L. CAO (2013): The Science of Geoengineering. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 41(1):231-256.
- CROOK, J. A., L. S. JACKSON & P. M. FORSTER (2016): Can increasing albedo of existing ship wakes reduce climate change? *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 121(4), 1549-1558.
- CRUTZEN, P. J. (2006): Albedo enhancement by stratospheric sulfur injections: A contribution to resolve a policy dilemma? *Climatic Change* 77, pp. 211-219.
- EARLY, J. T. (1989): Space-based solar screen to offset the greenhouse effect. *J. Brit. Interplanet. Soc.*, 42, 567-569.
- FEICHTER, J. & T. LEISNER (2009): Climate engineering: a critical review of approaches to modify the global energy balance. *The European Physical Journal Special Topics* 176, pp. 81-92.
- FEICHTER, J. & M. QUANTE (2017): From predictive to instructive: Using models for geoengineering. In: M. HEYMANN, G. GRAMELSBERGER & M. MAHONY (eds.): *Cultures of Prediction: Epistemic and Cultural Shifts in Environmental Science*, Routledge, London, 178-194.
- FIELD, L., D. IVANOVA, S. BHATTACHARYYA et al. (2018): Increasing Arctic sea ice albedo using localized reversible geoengineering. *Earth's Future*, 6, 882-901.
- FOKEN, T., B. HUWE & A. ARNETH (2021): *Der Energie- und Wasserhaushalt von Böden und ihre klimatische Bedeutung*. In: LOZÁN J. L., S.-W. BRECKLE, H. GRASSL & D. KASANG (Hrsg.). *Warnsignal Klima: Boden & Landnutzung*, S. 26-34.
- GESAMP (2019): High level review of a wide range of proposed marine geoengineering techniques. BOYD, P. W. & C. M. G. VIVIAN (eds.). *Rep. Stud. GESAMP No. 98*, 144 p.
- GRUBER, S., U. BLAHAK, F. HAENEL et al. (2019): A Process Study on Thinning of Arctic Winter Cirrus Clouds With High-Resolution ICON-ART Simulations. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 124, 5860-5888.
- HAMWEY, R. (2007): Active amplification of the terrestrial albedo to mitigate climate change: an exploratory study. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 12(4), pp. 419-439.
- HOFFMANN, F. & G. FEINGOLD (2021): Cloud Microphysical Implications for Marine Cloud Brightening: The Importance of the Seeded Particle Size Distribution. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 78(10), 3247-3262.
- IPCC (2013): *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. STOCKER, T. F. et al. (Hrsg.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.
- KRAVITZ, B. & H. KORHONEN (2022): *Climate Engineering*. Kapitel 18 in K.S. Carslaw (Hrsg.) *Aerosols and Climate*. Elsevier, 854pp.
- LATHAM, J. (1990): Control of global warming? *Nature* 347, 339-340.
- LAWRENCE, M. G., S. SCHÄFER, H. MURI et al. (2018): Evaluating climate geoengineering proposals in the context of the Paris Agreement temperature goals. *Nat Commun* 9, 3734.
- LENTON, T. M., & N. E. VAUGHAN (2009): The radiative forcing potential of different climate geoengineering options. *Atmospheric Chemistry and Physics* 9(15):5539-5561.
- LOHMANN, U. & B. GASPARINI (2017). A cirrus cloud climate dial? Cirrus cloud seeding may help to reduce climate warming, but large uncertainties remain. *Science*, 357, 6348: 248-249.
- MCINNES, C. R., R. BEWICK & J. P. SANCHEZ (2014): *Space-Based Geoengineering Solutions*. Kapitel 8 in R M Harrison, R E Hester (Hrsg.): *Geoengineering of the Climate System*. Issues in Environmental Science and Technology, Royal Society of Chemistry, 186-211.
- MITCHELL, D. L. & W. FINNEGAN (2009): Modification of cirrus clouds to reduce global warming. *Environ. Res. Lett.*, 4, 04510
- NIEMEIER, U. & C. TIMMRECK (2015): What is the limit of climate engineering by stratospheric injection of SO₂? *Atmos. Chem. Phys.*, 15, 9129-9141.
- NRC (2015). *Climate Intervention: Reflecting Sunlight to Cool Earth*. Washington, DC: The National Academies Press.
- PEARSON, J., J. OLDSOON & E. LEVIN (2006): Earth rings for planetary environment control. *Acta Astronautica* 58(1):44-57.
- PSAC (1965): *Restoring the quality of our environment: Report of the Environmental Pollution Panel of the President's Science Advisory Committee*.
- RIDGWELL, A., J. S. SINGARAYER, A. M. HETHERINGTON & P. J. VALDES (2009): Tackling Regional Climate Change By Leaf Albedo Bio-geoengineering. *Current Biology* 19(2):146-150.
- ROYAL SOCIETY (2009): *Geoengineering the climate: Science, governance and uncertainty*. London: The Royal Society.
- SALTER, S., G. SORTINO & J. LATHAM (2008): Sea-going hardware for the cloud albedo method of reversing global warming. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 366(1882):3989-4006.
- SEITZ, R. (2010): Bright water: hydrosols, water conservation and climate change. *Climatic Change*, 105, 365-381.
- SENEVIRATNE, S. I., S. J. PHIPPS, A. J. PITMAN et al. (2018): Land radiative management as contributor to regional-scale climate adaptation and mitigation. *Nature Geoscience*, 11, 88-96.
- SMITH, W. et al. (2022): Review of possible very high-altitude platforms for stratospheric aerosol injection. *Environ. Res. Commun.*, 4, 031002.
- STORELMO, T., W. R. BOOS & N. HERGER (2014): Cirrus cloud seeding: a climate engineering mechanism with reduced side effects? *Phil. Trans. R. Soc. A* 372: 20140116.
- TELLER, E., L. WOOD & R. HYDE (1997): Global warming and ice ages: I. Prospects for physics based modulation of global change. UCRL-JC-128715. Livermore, CA: Lawrence Livermore National Laboratory.
- TRENBERTH, K. E. (2022): *The Changing Flow of Energy Through the Climate System*. Cambridge: Cambridge University Press, 319pp.
- TWOMEY, S. (1977): The Influence of Pollution on the Shortwave Albedo of Clouds. *J. Atmos. Sci.* 34 (7), 1149-1152.
- WILD, M. (2017): Towards global estimates of the surface energy budget. *Curr Clim Change Rep* 3:87-97.
- WMO (2022): *Stratospheric aerosol injection and its potential effect on the stratospheric ozone layer*. Kapitel 6 in: *Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2022*, GAW Report No. 278, WMO Geneva, 325-383.
- ZARNETSKY, P. L., J. GUREVITCH, J. FRANKLIN et al. (2021): Potential ecological impacts of climate intervention by reflecting sunlight to cool Earth. *Proc Natl Acad Sci*, Vol. 118, No. 15 e1921854118.

Prof. Dr. Markus Quante
Helmholtz-Zentrum hereon GmbH markus.quante@hereon.de
Fakultät Nachhaltigkeit
Leuphana Universität Lüneburg quante@leuphana.de
Prof. Dr. Thomas Leisner
Institut für Meteorologie und Klimaforschung
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
thomas.leisner@kit.edu

QUANTE, M. & T. LEISNER (2023): *Das Strahlungsmanagement im Climate Engineering – ein Überblick*. In: LOZÁN J. L., H. GRAßL, S.-W. BRECKLE, D. KASANG & M. QUANTE (Hrsg.). *Warnsignal Klima*. S. 222-230. www.warnsignal-klima.de. DOI:10.25592/warnsignal.klima.climate.engineering.34