

Solar Radiation Modification (SRM)

Wirkweise, Risiken und Governance eines Eingriffs in das globale Klimasystem durch solares Geoengineering

Impressum

Herausgeber:

Umweltbundesamt
Fachgebiet V 1.1
Postfach 14 06
06813 Dessau-Roßlau
Tel: +49 340-2103-0
bürgerservice@uba.de
Internet: www.umweltbundesamt.de

Autorinnen und Autoren:

Leonie Bronkalla und Dana Ruddigkeit

Unter Mitarbeit von:

Juliane Berger, Ulrike Döring, Harald Ginzky,
Carmen Gottwald, Daniel de Graaf, Hans-Joachim Hermann,
Kay Köhler, Wera Leujak, Niklas Roming, Nadja Salzborn,
Johanna Siebenlist, Jens Tambke, Herwig Unnerstall,
Mathias Ulrich

Redaktion:

Fachgebiet V 1.1 Internationaler Klimaschutz
Leonie Bronkalla
Fachgebiet I 1.3 Rechtswissenschaftliche Umweltfragen
Dana Ruddigkeit

Satz und Layout:

Atelier Hauer + Dörfler GmbH

Publikationen als pdf:

www.umweltbundesamt.de/publikationen

Plakat (S. 33) zum Downloaden:

www.umweltbundesamt.de/publikationen/poster-risiken-von-solar-radiation-modification-srm

Bildquellen:

Titelbild: merydolla (Iryna Denysova)/AdobeStock
S. 11: Dana Ruddigkeit
Illustrationen: Umweltbundesamt

Der Text dieser Publikation ist lizenziert unter der Creative Commons Namensnennung – Weitergabe unter gleichen Bedingungen 4.0 International (CC BY-SA 4.0) Lizenz. Wenn nicht anders gekennzeichnet, sind alle Fotos und Logos von der oben genannten CC-Lizenz ausgenommen.



Stand: November 2024

ISSN 1862-4359

Solar Radiation Modification (SRM)

Wirkweise, Risiken und Governance eines Eingriffs in das globale Klimasystem durch solares Geoengineering

Inhalt

	Abkürzungsverzeichnis	6
	Solar Radiation Modification ist kein Klimaschutz	7
1	Der Begriff des Geoengineering	8
2	Rasante Entwicklungen in Politik und Wissenschaft	10
3	Die Theorie hinter der Idee von SRM als Lösung für den Klimawandel	13
	3.1 Strahlungshaushalt der Erde und Treibhauseffekt.....	13
	3.2 Die Albedo.....	13
	3.3 Modifikation des Strahlungshaushalts.....	14
4	Die Auswirkungen von SRM auf das globale Klima	15
5	Narrative und Rechtfertigungen für SRM	16
6	Verschiedene SRM-Ansätze im Überblick	17
	6.1 Planetares Sonnenschild und weitere weltraumbasierte Megastrukturen.....	18
	6.2 Stratosphärische Aerosolinjektion	20
	6.3 Ausdünnen von Zirruswolken (Cirrus Cloud Thinning).....	22
	6.4 Aufhellen mariner Wolken (Marine Cloud Brightening)	23
	6.5 Erhöhung der Oberflächen-Albedo	26
7	SRM-Forschung	29
	7.1 Unsicherheiten von SRM-Modellen	29
	7.2 Labor- und Feldexperimente	31
	7.3 Führt Forschung zur Anwendung?	32

8	SRM birgt viele Risiken	34
	8.1 Risiken für Wasserverfügbarkeit und Ernährungssicherheit	34
	8.2 Risiken für internationale, politische Konflikte	34
	8.3 Risiken für Treibhausgasminderung und Klimaanpassung	35
	8.4 Risiken für zukünftige Generationen	36
	8.5 Risiko der einseitigen und intransparenten Finanzierung	37
	8.6 Riskante Kostenberechnungen	37
	8.7 Risiken für Umwelt- und Meeresschutz	38
9	Ein internationales Regime für die übergreifende Steuerung von SRM?	39
	9.1 Der SRM- und Geoengineering-Begriff im internationalen Recht	40
	9.2 Biodiversitätskonvention und das De-Facto-Geoengineering-Moratorium	40
	9.3 ENMOD als Vertrag zur grundlegenden Regelung von SRM?	43
	9.4 Klimaschutzrecht	43
10	Regeln, die einzelne SRM-Ansätze begrenzen	44
	10.1 Regeln, die SAI-Aktivitäten begrenzen	44
	10.2 Regelungen für marines Geoengineering	46
	10.3 Rechtslage im Weltraum	47
	10.4 Weitere beschränkende Regelungen	48
	10.5 Zwischenfazit	48
11	Vorschläge für Regulierung und Steuerung von SRM	49
	11.1 Voranbringen eines Internationalen Nichtnutzungsabkommen	49
	11.2 Forschungsregulierung setzt ein Anwendungsverbot voraus	49
	11.3 Regulierung von SAI-Feldexperimenten vorerst nicht notwendig	50
	11.4 Verantwortungsvolle Finanzierung und -steuerung von Schreibtischforschung ..	51
	Quellenverzeichnis	52
	Liste völkerrechtlicher Verträge	62

Abkürzungsverzeichnis

AEUV	Vertrag über die Arbeitsweise der Europäischen Union
CBD	Convention on Biological Diversity, Biodiversitätskonvention
CCT	Cirrus Cloud Thinning
CDR	Carbon Dioxide Removal, Kohlenstoffdioxidentnahme
CMIP	Coupled Model Intercomparison Project
GeoMIP	Geoengineering Model Intercomparison Project
ILM	International Law Materials
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
LC/LP	London Convention and London Protocol
MCB	Marine Cloud Brightening
MP	Montreal Protocol
SAI	Stratospheric Aerosol Injection
SCoPEX	Stratospheric Controlled Perturbation Experiment
SO₂	Schwefeldioxid
SRM	Solar Radiation Modification / Solar Radiation Management
SSP	Shared Socioeconomic Pathways
THG	Treibhausgas
UNFCCC	United Nations Framework Convention on Climate Change
UNEP	United Nations Environment Program
UNEA	United Nations Environment Assembly
WMO	World Meteorological Organization

Abbildungen

Abbildung 1	
Geoengineering und Synonyme in Publikationen	9
Abbildung 2	
Publikation zu SRM	12
Abbildung 3	
Beispiele für Werte der Albedo verschiedener Landschaften	13
Abbildung 4	
Übersichtsgrafik Strahlungshaushalt	14
Abbildung 5	
Schematisierter Termination Shock	15
Abbildung 6	
Schema Risk vs. Risk Modellierung	30

Solar Radiation Modification ist kein Klimaschutz

Das UBA lehnt den Einsatz und die technische Entwicklung von SRM ab. Durch SRM kann weder das bisherige Klima konserviert, noch das vorindustrielle Klima wiederhergestellt werden. Es würde ein unvorhersagbares, neues globales Klima entstehen, das mit erheblichen regionalen Auswirkungen einhergeht.

Nach dem wissenschaftlichen Erkenntnisstand besteht bereits jetzt ausreichend Gewissheit über die Gefahren von SRM für die Ernährungssicherheit, Wasserverfügbarkeit und die Umwelt. Würde, aus welchen Gründen auch immer, ein globaler Einsatz von SRM gestoppt, käme es zu einem sprunghaften Temperaturanstieg mit katastrophalen Folgen. SRM kann weltweit Konflikte provozieren und Ungerechtigkeiten verschärfen.

SRM kann daher nach aktuellem Kenntnisstand keine zukünftige Notfalloption sein. Es ist weder schnell einsetzbar noch günstig. Es eignet sich auch nicht als Übergangstechnologie, um in der Zeit der SRM-Anwendung die Emissionen zu reduzieren und Technologien zur CO₂-Entnahme (CDR) zu entwickeln.

Über die bestehenden Governance-Strukturen hinaus ist ein internationales Nicht-Nutzungs-Abkommen anzustreben. Auf der Grundlage eines Anwendungs-Verbots kann über die begrenzende Regulierung kleinskaliger Forschungsvorhaben verhandelt werden.

Die Grenzen zwischen Forschung im Rahmen von Feldversuchen und Anwendung sind bei SRM fließend, da es überwiegend um das Testen von Technologien geht. Freilandexperimente, sowohl von Forschungseinrichtungen als auch von privaten Unternehmen, sind deshalb auszuschließen. Forschung mittels Computermodellen und weitere theoretische Studien können hingegen sinnvoll sein, müssen aber transparent und partizipativ durchgeführt werden.

SRM-Forschung ist keine Klimaschutzforschung: Eine Schwächung der Minderungsanstrengungen muss auch im Bereich der Forschungsfinanzierung ausgeschlossen werden. Daher ist eine Verschiebung von Forschungsgeldern, die bisher der Minderung von Treibhausgasemissionen und der Klimaanpassung dienen, hin zu einer Finanzierung der SRM-Forschung abzulehnen.

Zertifikate für Kühlungseffekte durch SRM, mit denen Treibhausgasemissionen kompensiert werden sollen, sind irreführend und lenken von tatsächlichen Klimaschutzmaßnahmen ab. Sie sind deshalb abzulehnen.

1

Der Begriff des Geoengineering

Die Vorstellung, die Landschaft und das Wetter durch Technologien beliebig zu modifizieren, gibt es schon seit den 1950er Jahren (Oomen, 2021; Oldfield, 2013; Schellnhuber, 2011). Im Jahr 1977 wurde der Begriff **Geoengineering** – also großtechnische Eingriffe in das Erdsystem – konkret in Bezug zum Klimawandel gesetzt (Marchetti, 1977; Budyko, 1977) und erhielt auch in den folgenden Jahrzehnten regelmäßig Aufmerksamkeit (Caldeira et al., 2017). Prominent wurde die Idee wiederum durch Veröffentlichungen des Nobelpreisträgers Paul Crutzen (Crutzen, 2006) sowie der Royal Society, die den Begriff Geoengineering durch ihre verbreitete Definition wohl endgültig mit dem Klimawandel verband (Royal Society, 2009). Demnach umfasst Geoengineering **bewusste und großskalige Eingriffe in das Klimasystem mit dem Ziel, die anthropogene Klimaerwärmung zu mildern**. Da der Fokus auf der Modifikation des Klimas liegt, findet man häufig auch den Begriff **Climate Engineering**.

Geoengineering hat sich nach und nach von einem theoretischen und philosophischen Ausdruck von Kontrolle und Macht hin zu einer (nichtsdestotrotz „techno-optimistischen“) möglichen ergänzenden Reaktionsform auf den Klimawandel neben Minderung und Anpassung gewandelt (Oomen et al., 2021). Auch wenn sich die Erwartung und die politische Relevanz der Debatte verändert haben, sind die vorgeschlagenen Methoden sowie die Streitpunkte in den letzten Jahrzehnten weitestgehend die gleichen geblieben. Lediglich werden immer neue, verharmlosende Begriffe gefunden, wie **Climate Intervention**, **Climate Remediation** oder auch **Climate Altering Technologies** (die deutschen Übersetzungen wie Klima-Intervention oder Klima-Sanierung sind insgesamt nicht geläufig, da die Debatte in erster Linie im internationalen Raum stattfindet). Teilweise werden sie bewusst eingesetzt, um Neutralität zu vermitteln

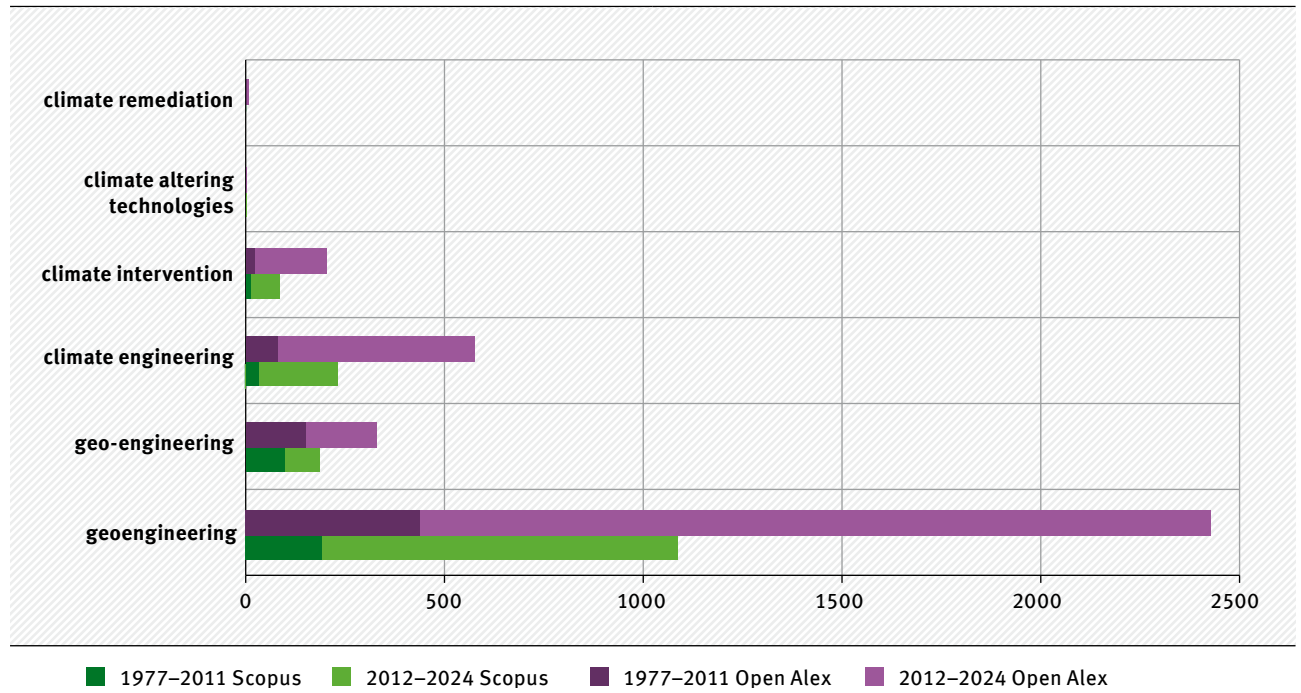
(Preston, 2013), jedoch ändern sie nichts an der bekannten Tatsache: Die Ansätze bergen große Risiken für Mensch und Umwelt. Und die Hoffnung auf eine vermeintlich einfache technologische Lösung, einen „Techno-Fix“ für den Klimawandel, lenkt von den wichtigen Klimaschutzmaßnahmen – Treibhausgas-minderung und Anpassung – ab und macht aus einer gesamtgesellschaftlichen Aufgabe der erforderlichen Transformationen ein scheinbar rein technisches Problem (Neuber et al., 2020).

Die zahlreichen Geoengineering-Ansätze lassen sich in zwei Kategorien unterteilen. Zum einen gibt es Ansätze zur **Beeinflussung des Strahlungshaushalts der Erde, auch solares Geoengineering** genannt. Der alternative Begriff **Solar Radiation Management** wurde bei einem NASA-Workshop im Jahr 2006 in der Absicht eingeführt, von der kontroversen Diskussion um Geoengineering abzulenken (Caldeira et al., 2017). Daher wird oft der weniger beschönigende, ebenfalls geläufige Begriff **Solar Radiation Modification** (SRM) verwendet. Einige SRM-Ansätze finden sich auch in der Literatur zu „Ice Sheet Interventions“ oder „Glacial Management“ und sollen dazu dienen, den Meeresspiegelanstieg zu verhindern. Die zweite Kategorie des Geoengineerings umfasst verschiedene Methoden zur Entnahme von Kohlenstoffdioxid aus der Atmosphäre, die unter dem Begriff **Carbon Dioxide Removal (CDR)** zusammengefasst werden. Man findet in politischen Zusammenhängen für CDR häufig den Begriff **Negative Emissionen** oder **Senken**.

Abbildung 1

Geoengineering und Synonyme in Publikationen

Anzahl der Suchergebnisse im Titel



Eigene Recherche auf www.scopus.com und <https://openalex.org/>. Stand 15.10.2024

Wegen der Gemeinsamkeit von SRM- und den meisten CDR-Ansätzen als groß angelegte Umwelteingriffe sowie der jahrzehntelangen Historie der Debatte um Geoengineering, die sich in der Vielzahl an Publikationen unter dem Begriff widerspiegelt (s. Abbildung 1) ist es wichtig, den Kontext zum Oberbegriff Geoengineering nicht zu verlieren. Gleichzeitig ist Geoengineering weiterhin von Bedeutung, nicht zuletzt, weil richtungsweisende internationale Entscheidungen auf diesen Begriff abstellen (Kap. 9).

In den Medien und der öffentlichen Wahrnehmung wird insbesondere SRM auch weiterhin mit Geoengineering in Verbindung gebracht, während CDR oft separat und losgelöst vom Sammelbegriff thematisiert wird. Diese Trennung wird teils bewusst eingesetzt, um eine positivere Kommunikation und Wahrnehmung von CDR zu ermöglichen (Müller-Hansen et al., 2023; Heyward, 2013). Denn SRM wird in der öffentlichen Wahrnehmung noch eher als „Größenwahn“ und negativ empfunden (Carlisle et al., 2020).

2

Rasante Entwicklungen in Politik und Wissenschaft

Insbesondere in den Jahren von 2006 bis circa 2013 wurde Geoengineering intensiv diskutiert. Es wurden wichtige politische Entscheidungen dazu getroffen, die bis heute von großer Bedeutung sind. Unter der Biodiversitätskonvention (CBD) der vereinten Nationen (UN) wurde 2010 das De-Facto-Moratorium für Geoengineering (UBA, 2019) als ein bedeutender **politischer Meilenstein** beschlossen. Auch die Vertragsstaaten des London-Protokolls/der London-Konvention (LP/LK) einigten sich bereits 2008 darauf, dass keine kommerzielle Nutzung der Meeresdüngung erlaubt sein soll und dass Feldversuche darauf zu überprüfen sind, dass sie keine negativen Auswirkungen auf die Umwelt haben. Im Anschluss verhandelten die Vertragsstaaten einen rechtlich verbindlichen Regelungsansatz für marines Geoengineering, der schließlich 2013 beschlossen wurde (s. auch Kap. 10.2). Eine internationale Konferenz zu Geoengineering fand im Jahr 2010 statt (ASOC, 2010a; ASOC., 2010b). In diesem Zeitraum mehrten sich Nachrichten zu Geoengineering in Internet- und Printmedien (Mercer et al., 2011). Diese erste Phase veranlasste auch das UBA dazu, sich zu Geoengineering zu positionieren und die Öffentlichkeit zu informieren (UBA, 2011).

Nach diesem Zeitraum hat sich die Debatte um Geoengineering zunächst etwas beruhigt, bis sie mit den spürbar zunehmenden, drastischen Auswirkungen des Klimawandels in den letzten Jahren wieder verstärkt aufkam und nun ebenso rasant fortschreitet wie die Erderwärmung selbst. Von zentraler Bedeutung für die **Intensivierung der Debatte** war die wissenschaftliche Erkenntnis, dass der Temperaturanstieg möglichst auf 1,5 °C begrenzt werden soll, um das Risiko negativer Auswirkungen der Klimaerwärmung auf Menschen und Umwelt möglichst gering zu halten (IPCC, 2018). Dies wurde nicht zuletzt auch 2015 im Übereinkommen von Paris (ÜvP) festgeschrieben, in dem sich die Mitgliedsstaaten einigten, die Erderwärmung auf deutlich unter 2 °C zu begrenzen und alle Anstrengungen zu unternehmen, sie möglichst auf 1,5 °C zu beschränken. Doch weil die globalen jährlichen Emissionen weiter steigen, wenn auch langsamer, statt drastisch zu sinken, wird ein Überschreiten der 1,5 °C derzeit von vielen Menschen als unvermeidbar angenommen. Aus dieser Sorge

entwickelte sich die Idee, dass man nach einem Überschreiten des Temperaturziels (engl.: overshoot) wieder dahin zurückkehren oder den Planeten sogar bis zur vorindustriellen Durchschnittstemperatur abkühlen könnte. Dazu wird zunehmend die Notwendigkeit von CDR oder SRM als gesetzt unterstellt (Kap. 5). Dabei sind essenzielle Fragen und Herausforderungen zu Klimawirksamkeit, Nachhaltigkeitskriterien, Skalierbarkeit, Risiken, politischen Folgen und Marktmechanismen auch weiterhin nicht geklärt und entsprechen, trotz massiver Forschung, ganz überwiegend dem Stand von 2011. Insbesondere bei SRM handelt es sich größtenteils lediglich um theoretische Ansätze, die keineswegs anwendungsreif sind.

Die Debatte hat sich nicht nur hinsichtlich ihrer Intensität, sondern auch hinsichtlich der Begrifflichkeiten zu einer **Trennung von CDR und SRM** weiterentwickelt. CDR wird dabei auch immer weniger in den Zusammenhang von Geoengineering gesetzt. Aufgrund der unterschiedlichen politischen Bedeutung von SRM und CDR verwendet der Zwischenstaatliche Ausschuss für Klimaänderungen (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) den Begriff Geoengineering seit dem sechsten Berichtszyklus nicht mehr, sondern behandelt die beiden Kategorien getrennt (IPCC, 2018; IPCC 2023).

Auch im politischen Raum werden SRM und CDR zunehmend als unterschiedliche Themen behandelt. So ist CDR in politischen Strategien einiger Länder, inklusive Deutschland, bereits verankert (Smith et al., 2024; BMWK, 2024; EU Council, 2024), während ein globaler Einsatz von SRM derzeit nicht vorgesehen ist. Deutschland und die EU argumentieren klar gegen die Anwendung von SRM. Die deutsche Bundesregierung positioniert sich in ihrer Klimaaußenpolitikstrategie „aufgrund der bestehenden Unsicherheiten, Implikationen und Risiken“ gegen SRM, bekräftigt das CBD-De-Facto-Moratorium und distanziert sich von Forschung, „die auf die Entwicklung und einen möglichen großskaligen Einsatz der Technologien abzielen [soll]“ (Bundesregierung, 2023). Die EU-Kommission bekräftigte in einem Bericht zum Zusammenhang von Klima und Sicherheit die Gültigkeit des De-Facto-Moratoriums der CBD und

betonte die enormen Risiken von SRM ([EU Kommission, 2023](#)). Das EU-Parlament fordert in einer Resolution die EU-Kommission und die EU-Mitgliedsstaaten dazu auf, ein internationales **Abkommen zur Nicht-Nutzung** von SRM zu initiieren ([EU Parlament, 2023](#)). Auch die Afrikanische Umweltministerkonferenz verabschiedete einen Beschluss mit der Forderung nach einem internationalen Abkommen zur Nicht-Nutzung von SRM ([AMCEN, 2023](#)).

Auf der Ebene der **Vereinten Nationen (UN)** bestehen bislang erst wenige rechtsverbindliche Vorgaben, doch auch hier zeichnet sich die Trennung von SRM und CDR ab. Laut Artikel 4 (1) des Übereinkommens von Paris sollen die Klimaziele auch mittels Senken (darunter sind natürliche oder künstliche Systeme zu verstehen, die CO₂ aus der Atmosphäre aufnehmen und speichern können), erreicht werden ([ÜvP, 2015](#)). Auf Klimaverhandlungen der Klimarahmenkonvention (UNFCCC) wird damit zunehmend über Negativ-Emissionen verhandelt, ohne den Bezug zu Geoengineering herzustellen. Auf einen Resolutionsentwurf zu Geoengineering auf der vierten Umweltversammlung der Vereinten Nationen (UNEA-4) ([Schweiz, 2019](#)) folgte ein Resolutionsentwurf explizit zu SRM auf der UNEA-6 ([UNEA, 2024](#); [ENB, 2024](#)), wobei auch der zweite Entwurf trotz Trennung der Begriffe abgelehnt wurde. Neben den genannten UN-Verhandlungen gibt es eine Vielzahl von politischen Berichten und Governance-Prozessen, die teils Geoengineering, teils nur CDR betrachten (siehe Kap. 8).



UNEA-6 Plenum

Auch **Nichtregierungsorganisationen (NGOs)** und andere Institutionen haben sich in den letzten Jahren gegen SRM positioniert (etwa das Climate Action Network, [CAN, 2019](#)). Auch nationale Organisationen wie der Bund für Umwelt und Naturschutz ([BUND, 2023](#)) und die Heinrich-Böll Stiftung ([HBS, 2018a](#); [HBS, 2018b](#)) haben Positionspapiere veröffentlicht. Zudem haben Forschende aus verschiedenen Ländern, darunter der UBA-Präsident Dirk Messner, eine Initiative für ein Abkommen zur Nicht-Nutzung von SRM gestartet (<https://www.solargeoeng.org/>; [Biermann et al. 2022](#)). Daneben gründeten sich zahlreiche weitere **Initiativen und Thinktanks**, und offene Briefe wurden verfasst. Zu nennen wären beispielsweise „Carnegie Climate Governance Initiative“ (C2G, <https://c2g2.net/>), „The Alliance for Just Deliberation on Solar Geoengineering“ (DSG, <https://sgdeliberation.org/>) mit einem Jugendnetzwerk „Climate Intervention Network“ (CIN, <https://sgdeliberation.org/activities/youth-engagement-program/climate-intervention-network/>), „The Degrees Initiative“ (<https://www.degrees.ngo/>), „SRM Youth Watch“ (<https://www.srm youthwatch.org/>), „Call for Balance“ (<https://www.call-for-balance.com/>) und „International Center for Future Generations (ICGF, <https://icfg.eu/climate-interventions/>).

Dass SRM innerhalb der **Forschungsgesellschaft** an Aufmerksamkeit gewonnen hat, zeigt die stetig wachsende Anzahl wissenschaftlicher Studien diverser Fachrichtungen, die sich explizit mit SRM und einzelnen SRM-Ansätzen auseinandersetzen (s. Abbildung 2). Darüber hinaus gibt es zunehmend private, aber auch staatlich geförderte Forschungsprojekte, die SRM erforschen. Der Geoengineering-Monitor der ETC-Group und der Böll-Stiftung gibt einen aktuellen Überblick über die Vielzahl weltweiter Projekte: <https://map.geoengineeringmonitor.org/>. In Deutschland gab es ein UBA-Vorhaben zu den Risiken von SRM ([UBA 2024](#); [UBA, 2023](#)) sowie zuvor eines der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG, 2019). Die EU förderte bis 2015 eine Bewertungsstudie namens EuTRACE ([Schäfer et al., 2015](#)). Derzeit laufen über EU-Horizon-Fördermittel zwei Projekte, die sich mit SRM beschäftigen, mit den Akronymen GENIE (<https://genie.ece.iiasa.ac.at/>) und Co-CreatE (<https://co-create-project.eu/>). International sind darüber hinaus diese Projekte beispielhaft zu nennen: Die „Lighthouse-Activity“ des World Climate Research Programme zu Geoengineering (<https://www.wcrp-climate.org/ci-overview>) und das Geoengineering

Model Intercomparison Project (GeoMIP) (<https://climate.envsci.rutgers.edu/GeoMIP/>). Zu GeoMIP gibt es regelmäßig eigene Konferenzen (GeoMIP, 2024; GRC, 2024; GRC, 2022; GRC, 2017). Das Programm der 28. Generalversammlung der Internationalen Union für Geodäsie und Geophysik (IUGG) im Jahr 2023 beinhaltete einige Vorträge zu SRM und Wettermodifikation. Die IUGG hat im Anschluss eine Resolution zu SRM publiziert, die bestätigt, dass SRM weder Ergänzung noch Ersatz für die Minderung von Treibhausgasen (THG) ist (IUGG, 2023). Vorträge zu SRM gab es ebenfalls auf den Konferenzen der Europäischen Union für Geowissenschaften (EGU, <https://www.egu24.eu/>) und der Amerikanischen Union für Geophysik (AGU, <https://www.agu.org/annual-meeting>).

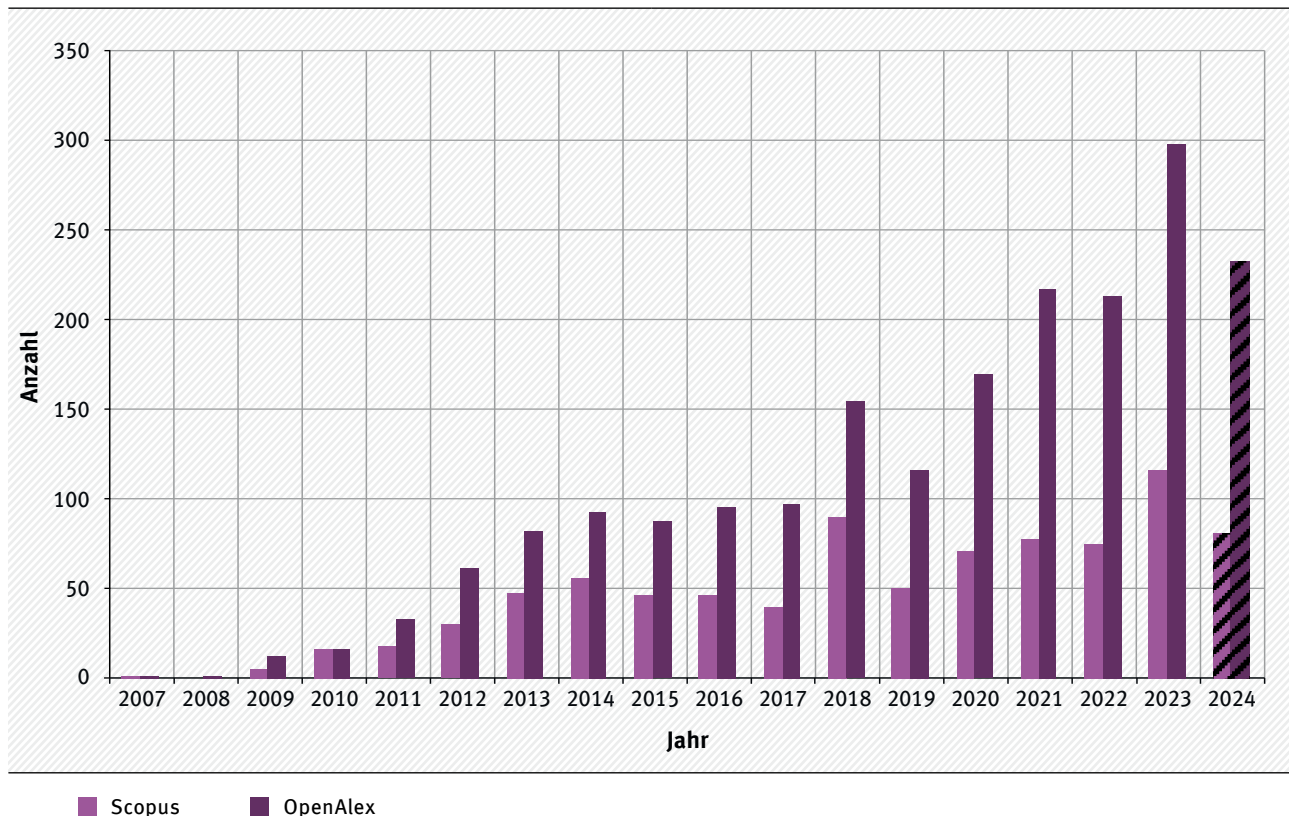
Im Jahr 2023 erzeugten drei **institutionelle Berichte** große Aufmerksamkeit in den Medien und damit der öffentlichen Wahrnehmung. Zum einen war dies ein

Bericht zu SRM „One Atmosphere“ (UNEP, 2023), der von externen Autor*innen ohne Staatsauftrag und -beteiligung im Auftrag des Umweltprogramms der Vereinten Nationen (UNEP) veröffentlicht wurde. Kurz darauf folgte ein nicht minder brisanter Bericht der US-Regierung, der zwar nur einen theoretischen Plan für Forschung und Governance von SRM beschreibt und ausdrücklich nichts an der Klimapolitik ändern soll (Whitehouse, 2023), aber medial als konkretes Forschungsprogramm verbreitet wurde. Außerdem haben die Weltkommission für Ethik in Wissenschaft und Technologie (COMEST), sowie der UN Menschenrechtsrat Berichte in Auftrag gegeben und veröffentlicht (COMEST, 2023; UNGA 2023). Während COMEST sich mit den theoretischen Potentialen von SRM und deren Verwirklichung und Regulierung auseinandersetzt, betont der Bericht des Menschenrechtsrats die Gefahren für die Wahrnehmung der Menschenrechte und fordert ein Anwendungsverbot.

Abbildung 2

Publikation zu SRM

Anzahl der Suchergebnisse zu Synonymen für SRM* in Titel, Abstract und Key Words



*solar radiation modification“ OR „solar radiation management“ OR „solar geoengineering“ OR „solar climate intervention“ OR „stratospheric aerosol injection“ OR „planetary sunshade“ OR „marine cloud brightening“ OR „cirrus cloud thinning“

Eigene Recherche auf www.scopus.com und <https://openalex.org/>. Stand 15.10.2024

3

Die Theorie hinter der Idee von SRM als Lösung für den Klimawandel

3.1 Strahlungshaushalt der Erde und Treibhauseffekt

Die Sonnenstrahlen treffen als kurzwellige Strahlung auf die Atmosphäre der Erde. Etwa ein Drittel davon wird wieder zurück ins Weltall reflektiert. Der größte Teil der kurzwelligen Sonnenstrahlung erreicht jedoch die Erdoberfläche und wird dort aufgenommen. Die aufgenommene Strahlung erwärmt die Erdoberfläche und wird dann wiederum als langwellige Wärmestrahlung (Infrarotstrahlung) von der Erdoberfläche in die Atmosphäre abgegeben. Ein Bruchteil davon verlässt die Atmosphäre durch das sogenannte atmosphärische Fenster direkt ins Weltall. Der Großteil aber wird von den THG (z. B. Wasserdampf, Kohlendioxid (CO₂), Methan, Ozon, Lachgas) aufgenommen. Die THG-Moleküle geben die Wärme anschließend wieder in alle Richtungen ab, also auch zurück in Richtung Erdoberfläche. Dadurch kommt es insgesamt zu einer Erwärmung der unteren Luftschichten im Vergleich zu einer Atmosphäre ohne THG, ähnlich dem Effekt einer Decke. Diesen Prozess nennt man Treibhauseffekt (vgl. [Lesch et. al, 2021](#)).

Seit der Industrialisierung erhöht sich durch unsere Wirtschafts- und Lebensweise die Menge an freigesetzten THG-Emissionen stetig. Die in der Folge zunehmende THG-Konzentration in der Atmosphäre sorgt dafür, dass mehr Wärmeenergie im System verbleibt und sich die Atmosphäre weiter erwärmt. Dieser von der Menschheit verstärkte Treibhauseffekt verursacht den anthropogenen (vom Menschen verursachten)

Klimawandel ([Rahmstorf et al., 2019](#)). Der Zusammenhang zwischen insgesamt vom Menschen emittiertem CO₂ und der so verursachten Erwärmung ist dabei ungefähr linear, d. h. proportional ([IPCC, 2021](#)).

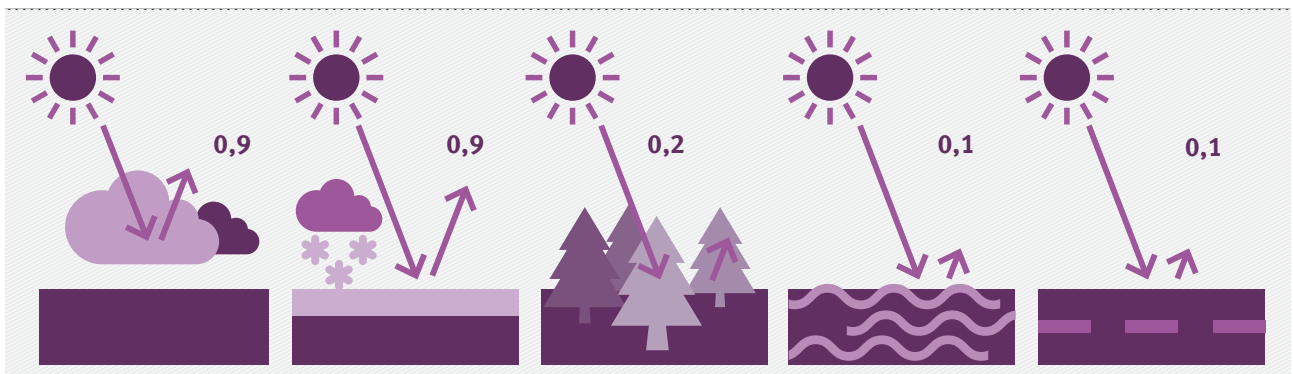
Es gibt also vier besonders wichtige Strahlungskomponenten: Die einfallende und die reflektierte kurzwellige Sonnenstrahlung sowie die aufwärts und die abwärts gerichtete langwellige Wärmestrahlung. Diese vier Komponenten können miteinander verrechnet werden. So erhält man eine vereinfachte Strahlungsbilanz der Erde, auch Strahlungshaushalt der Erde genannt ([Foken, 2016](#)). Im Detail lässt sich die Strahlungsbilanz mit sehr genauen physikalischen Modellen berechnen.

3.2 Die Albedo

Die Albedo („Weißheit“) beschreibt das Rückstrahlvermögen der Oberfläche eines Objektes oder auch einer Landschaft. Das wird im Falle von Planeten wie der Erde durch das Verhältnis von reflektierter Sonnenstrahlung zu einfallender kurzwelliger Sonnenstrahlung bestimmt. Die Albedo ist demnach eine Zahl zwischen 0 und 1. Eine Albedo von 0,9 bedeutet, dass 90 % der Sonnenstrahlen bzw. des Lichts reflektiert werden. Solche Werte hat etwa Schnee, aber auch Wolken können solch hohe Werte erreichen. Asphalt dagegen hat eine niedrige Albedo von 0,1, so dass der Großteil der Sonnenstrahlung aufgenommen wird und sich die Oberfläche deutlich stärker erhitzt als andere Oberflächen. Die Werte von Wäldern und Ozeanen bewegen sich dazwischen ([Foken, 2016](#)).

Abbildung 3

Beispiele für Werte der Albedo verschiedener Landschaften



Quelle: Umweltbundesamt

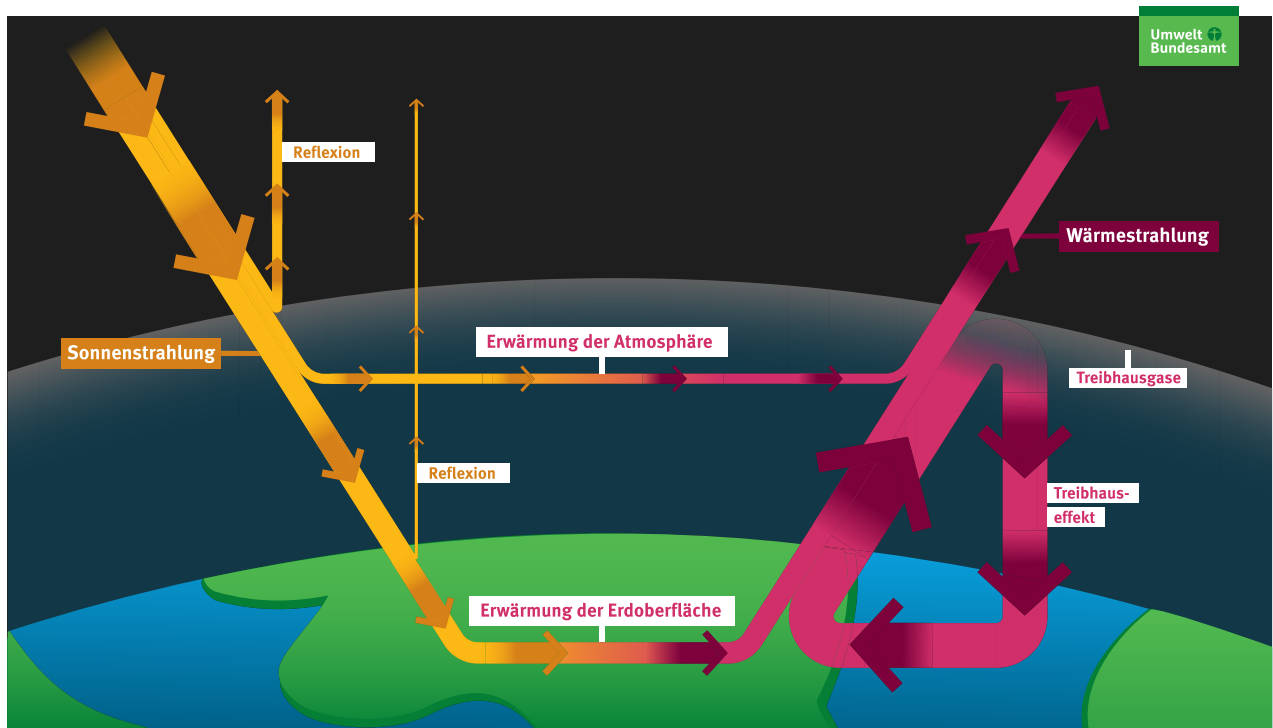
3.3 Modifikation des Strahlungshaushalts

Durch SRM soll in den meisten Fällen die Albedo der Erde erhöht werden. Dies kann in der Atmosphäre, an Wolken oder erst auf der Erdoberfläche geschehen (Kap. 6). Bei der Idee von Reflektoren im Weltraum wird dagegen von vornherein die auf die Erde treffende Strahlung reduziert. Je nach Ansatz wird die Sonnenstrahlung (oder bestimmte Wellenlängenbereiche) dadurch direkt reflektiert oder sie wird gestreut und trifft noch als diffuse Strahlung auf die Erdoberfläche (Baur et al., 2023a). Einer der spekulativen Ansätze soll dazu führen, dass mehr Wärmestrahlung die Atmosphäre verlässt (Kap. 6.3 zu Cirrus Cloud Thinning, CCT). Viele Publikationen (und demnach auch Aussagen in dieser Broschüre) beziehen sich jedoch primär auf die SRM-Ansätze, die die einfallende Sonnenstrahlung verringern, und darunter insbesondere auf die sogenannte stratosphärische Aerosolinjektion (Kap. 6.2 zu SAI). SRM kann (bis auf CCT) logischerweise nur auf der Tagseite der Erde wirken, während jedoch THG über die gesamte Atmosphäre verteilt zur Erderwärmung führen, d. h. auch bei Nacht (IPCC, 2014). Daraus ergibt sich, dass SRM die Erde nicht homogen abkühlen kann und auch nicht den Treibhauseffekt verändert, sondern nur die Strahlungsbilanz (Kap. 4).

Die Idee, dass SRM gegen die Erderwärmung einsetzbar sei, beruht vor allem auf Beobachtungen der globalen Durchschnittstemperatur nach einzelnen großen Vulkanausbrüchen. Nach dem Ausbruch des Pinatubo im Jahr 1991 beispielsweise kühlte sich die Erdoberfläche innerhalb weniger Jahre um ungefähr 0,5 °C ab (IPCC, 2014). Dieser Kühlungseffekt – entstanden durch die Verschattung aufgrund ausgestoßener Ascheteilchen und Schwefelverbindungen – soll durch SRM imitiert werden. Bei Vulkanausbrüchen sind Ort und Höhe der Freisetzung der Partikel für das Ausmaß der kühlenden Wirkung entscheidend. So macht es einen Unterschied, wo und in welchem Umfang SRM eingesetzt würde, also ob nur auf der nördlichen oder der südlichen Welthälfte, über den Polen oder am Äquator (Bednarz et al., 2023). Obwohl aus den Zusammenhängen zwischen Vulkanausbrüchen und globalen Temperaturunterschieden oft die theoretische Wirkung von SRM abgeleitet wird, ist ein direkter Vergleich nur begrenzt möglich. Daher bestehen weiterhin erhebliche Unsicherheiten zu den genauen Auswirkungen von SRM (DFG; 2014).

Abbildung 4

Übersichtsgrafik Strahlungshaushalt



Quelle: Umweltbundesamt

4

Die Auswirkungen von SRM auf das globale Klima

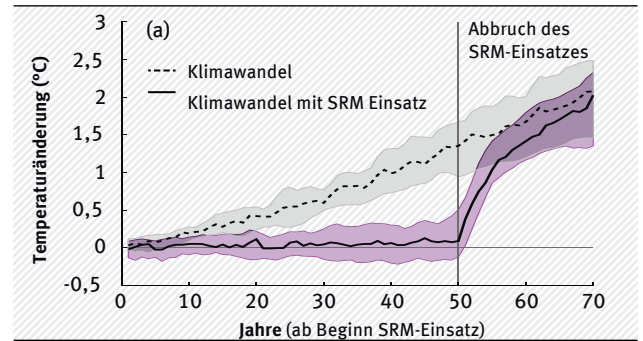
Eine Feststellung ist sicher: Durch SRM kann das vorindustrielle Klima nicht wieder hergestellt noch das derzeitige konserviert werden (Kravitz et al., 2013; MacCracken, 2009). Durch die Manipulation des Strahlungshaushaltes würde das gesamte Klimasystem grundlegend verändert werden. Darüber hinaus adressiert SRM lediglich die Erderwärmung als ein Symptom des Klimawandels und nicht seine Ursache, die anthropogenen THG-Emissionen (Quaas et al., 2017).

Das erklärt auch die größte Gefahr, die von SRM ausgeht: der sogenannte **Abbruchs-Schock (engl.: termination shock)**. Würde der Einsatz von SRM beendet, käme es zu einem sprunghaften Anstieg der Erderwärmung und damit zu einem plötzlichen Klimawandel innerhalb weniger Jahre (Brovkin et al., 2008; Jones et al., 2013). Eine Anpassung von Menschen, Tieren und Pflanzen an einen so schnellen Temperaturanstieg (Abbildung 5) wäre schwer bis unmöglich (IPCC, 2014). Dies könnte einen enormen Verlust an Biodiversität bis hin zu Massenaussterben nach sich ziehen (Trisos et al., 2018). Der Abbruch von SRM könnte dabei durch terroristische Angriffe oder militärische Konflikte, Naturkatastrophen oder Kollisionen im Weltraum, die die Infrastruktur zerstören, ausgelöst werden (Parker, 2018).

Die Maskierung der Erderwärmung durch SRM müsste deshalb so lange aufrechterhalten und angepasst werden, bis keine THG mehr ausgestoßen werden. Es müsste sogar darüber hinaus aufrecht erhalten werden bis die THG-Konzentrationen in der Atmosphäre wieder auf Werte abgenommen hat, bei denen die damit verbundene Erwärmung so gering wäre, dass sich Menschen und Ökosystem erfolgreich anpassen könnten. Ein Teil des emittierten CO₂ verbleibt über tausende Jahre in der Atmosphäre und verursacht weiterhin einen zusätzlichen Treibhauseffekt. Zum Zeitpunkt eines möglichen SRM-Einsatzes kann nicht abgesehen werden, ob die notwendigen Emissionsreduktionen tatsächlich umgesetzt werden und sich die Verfügbarkeit von CDR tatsächlich so entwickelt, dass SRM irgendwann schrittweise abgesetzt werden könnte. In jedem Fall müsste die kontinuierliche Durchführung von SRM über mehrere Generationen und Jahrhunderte hinweg sichergestellt werden (Baur et al., 2023b; MacMartin et al., 2014).

Abbildung 5

Schematisierter Termination Shock



Quelle: Umweltbundesamt nach (IPCC, 2014)

Darüber hinaus ist auch zu berücksichtigen, dass der gewünschte Effekt sich auf die globale Durchschnittstemperatur bezieht, während es in verschiedenen Klimazonen und Regionen der Erde zu **Unterkühlung oder zusätzlicher Erwärmung** kommen würde. Meistens wird eine Abkühlung der Tropen projiziert, während die Polregionen sich weiter erwärmen würden. Diese Temperaturdifferenzen verändern wiederum die Verteilung und Häufigkeit der weltweiten Niederschläge, insbesondere des Monsuns (Baur et al., 2024; Roy, 2022; Irvine et al., 2019; Gabriel et al., 2017; Kravitz et al., 2013; Davies, 2011). Dies würde zu einem schwächeren **Wasserkreislauf** und stärkerer Wüstenbildung führen und negative Auswirkungen auf Menschen, Tier- und Pflanzengesellschaften haben. **Globale Windzirkulationen**, wie der Jet-Stream, Ozeanströmungen sowie die innertropische Konvergenzzone würden sich als Folge von SRM verlagern (Tilmes et al., 2013; MacCracken et al., 2013; Davies, 2011).

Eine zentrale Komponente in dieser Auswirkungskette ist die Temperatur der Stratosphäre. Dort ausgebrachte Stoffe würden die Sonnenstrahlung nicht nur reflektieren, sondern auch aufnehmen und so die Stratosphäre erwärmen. Diese Temperaturerhöhung um bis zu mehrere Grad Celsius würde ebenfalls die Dynamik der Atmosphäre verändern. Eine **Erwärmung der tropischen Stratosphäre** könnte so die quasi-biennale Oszillation verlangsamen oder ganz zum Erliegen bringen (Laakso et al., 2022). Dieses Windsystem beeinflusst die Dynamik von Hurrikanen und wiederum des indischen Monsuns (DWD, 2021).

5

Narrative und Rechtfertigungen für SRM

Selbst unter den größten Verfechter*innen von SRM herrscht Einigkeit darüber, dass SRM auf Grund der Gefahren und Ungewissheit derzeit keinesfalls global eingesetzt werden sollte (vgl. [Callies, 2019](#)). Dennoch wird ein zukünftiger Einsatz von einigen nicht ausgeschlossen, sondern vielmehr dessen potentielle Unvermeidbarkeit behauptet ([COC, 2023](#); [MacMartin et al., 2014](#)). Dazu werden hauptsächlich zwei Rechtfertigungen herangezogen ([Parson et al., 2013](#)).

Die erste basiert auf der Annahme, dass die Folgen des Klimawandels so katastrophal werden, dass SRM trotz all der bestehenden Risiken auf unkoordinierte Weise als **verzweifelte Notlösung** herangezogen werden könnte, um die Erderwärmung zu stoppen. Dabei wird angenommen, dass die Gefahren von SRM im Vergleich mit den Gefahren eines ungebremsten Klimawandels als das kleinere Übel (engl.: lesser evil) interpretiert werden könnten. Doch ob SRM tatsächlich jemals als geeignete Notlösung betrachtet werden kann, ist zweifelhaft und Gegenstand wissenschaftlicher Studien ([Neuber et al., 2020](#); [Gardiner, 2013](#); [Gardiner et al., 2010](#)). Diskutiert werden nicht allein ethische Gründe, sondern auch die Tatsache, dass die technische Entwicklung der Infrastruktur rund zwei Jahrzehnte dauern könnte und vermutlich nicht – wie oftmals behauptet – schnell und kostengünstig zur Verfügung stünde ([Smith, 2024](#)). Weil SRM als bloß kurzfristige Notfalloption also nicht gut geeignet sei, sei demnach ein frühzeitiger Einsatz vorzubereiten.

Der zweiten Rechtfertigung nach könnte man durch einen moderaten und zeitlich begrenzten Einsatz von SRM **Zeit kaufen**, um die THG-Emissionen währenddessen gemäßigt zu reduzieren, statt die eigentlich benötigten drastischen THG-Minderungen durchzusetzen (engl.: buying time argument). Das soll zum einen die Kosten für wirtschaftliche Innovationen senken und zum anderen den Druck zur Anpassung an die Folgen des Klimawandels senken. Es gibt zahlreiche vereinfachte Darstellungen davon, wie die Kurve der globalen Durchschnittstemperatur durch einen SRM-Einsatz abgeflacht werden könnte (engl.: peak-shaving). Das „peak-shaving“ setzt voraus, dass parallel zum SRM-Einsatz rasante THG-Minderungen

vorgenommen werden müssten, damit SRM möglichst schnell überflüssig würde und nicht wie zuvor beschrieben über mehrere Jahrhunderte aufrechterhalten werden müsste ([Neuber et al., 2020](#)). Dabei würde die Notwendigkeit der Emissionsreduktion wohl erst recht vernachlässigt werden (engl.: mitigation deterrence, s. Kap. 8.2), wenn SRM sich tatsächlich so sicher und flexibel einsetzen ließe, wie es für diese Idee angenommen wird.

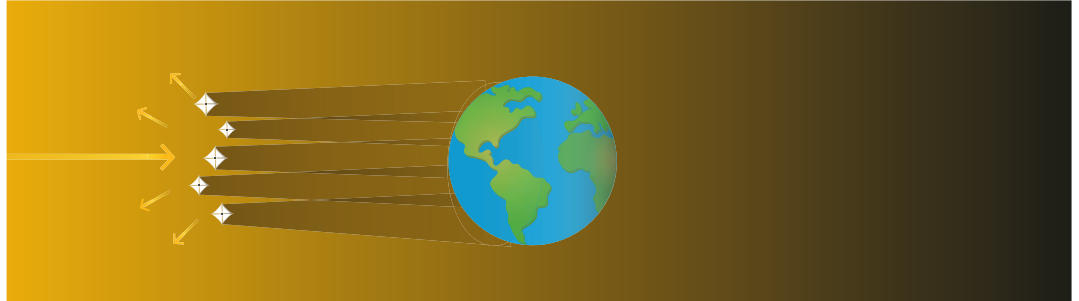
Ein weiteres, weniger bekanntes Argument zur Rechtfertigung von SRM ist, dass die Freisetzung von THG und der damit verbundene Klimawandel bereits ein weitaus riskanteres Experiment darstellte, dass die Menschheit dennoch eingegangen ist. Daher – so die Argumentation – könne man auch ein weiteres Experiment wagen und SRM ausprobieren. Jedoch ist hier aus ethischer Perspektive die Unterscheidung in bewusste und unbeabsichtigte Handlungen entscheidend und der Klimawandel dementsprechend nicht mit einem SRM-Einsatz gleichzusetzen ([Schäfer et al., 2015](#); [Owen, 2014](#)). Das Argument suggeriert außerdem, dass das „Folgeexperiment“ dieselben Wirkmechanismen betrifft wie die Erderwärmung. Tatsächlich greift es aber in neue Teilsysteme des Klimasystems ein (Kap. 3.1).

Vor dem Hintergrund der unvorhersagbaren Klimaänderungen und des unvergleichlichen Eingriffs in die Umwelt (und eventuell den Weltraum) durch SRM stellt sich die ethische Frage nach der Rolle des Menschen in der Natur. In diesem Zusammenhang wird der Vorwurf untersucht, dass es für SRM gar keine Rechtfertigung gebe, sondern es vielmehr Ausdruck menschlicher Hybris, also extremer Selbstüberschätzung, sei ([Owen, 2014](#)).

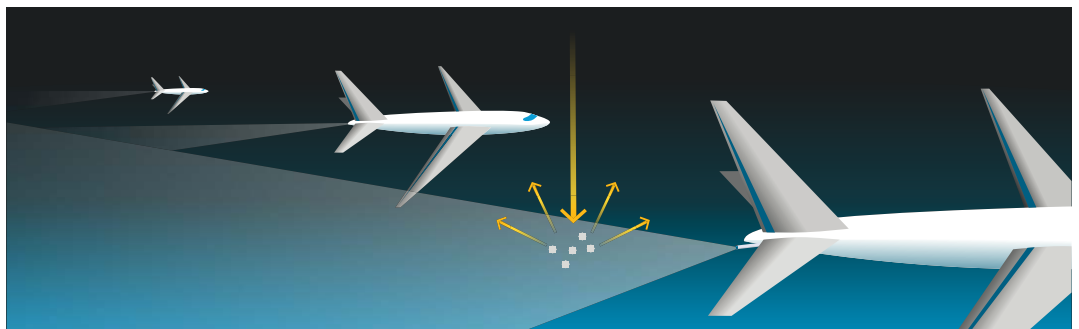
6

Verschiedene SRM-Ansätze im Überblick

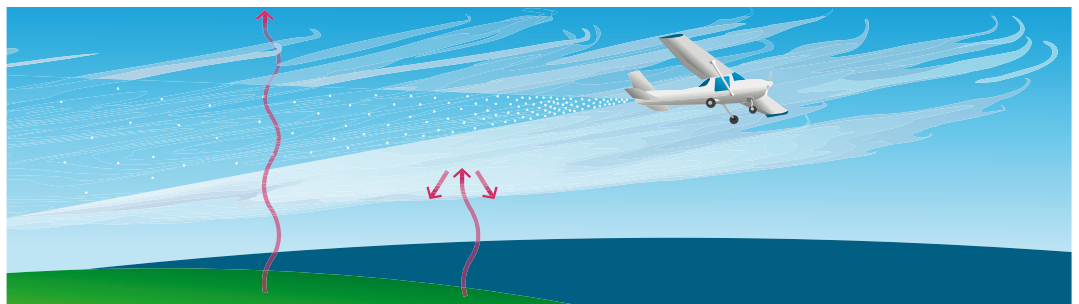
6.1



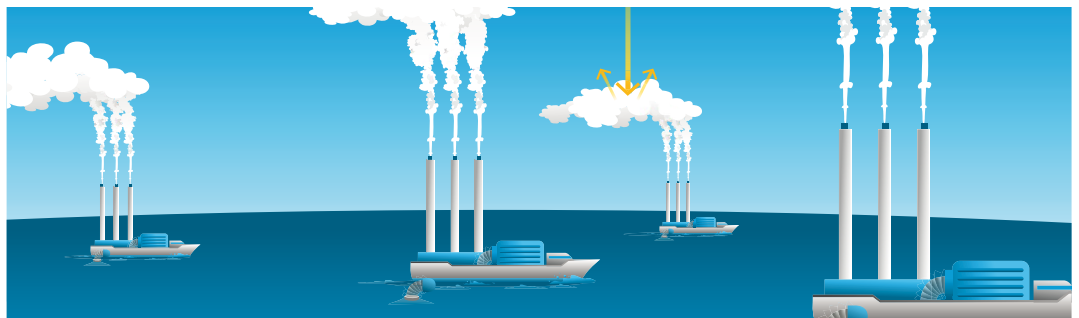
6.2



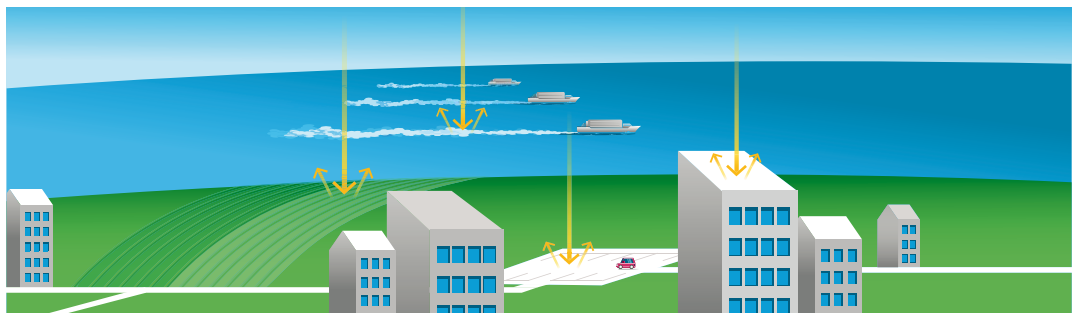
6.3



6.4



6.5



6.1 Planetares Sonnenschild und weitere weltraumbasierte Megastrukturen

Gigantische Weltraum-Spiegel, die einen Teil des Sonnenlichts daran hindern, auf die Erde zu treffen: Was nach Science-Fiction klingen mag, ist zumindest für einige Forschende eine ernstzunehmende Option. Am bekanntesten ist derzeit der Vorschlag eines planetaren Sonnenschildes (engl.: **planetary sunshade** oder **sunshield**). Die Megastruktur müsste hinter dem sogenannten inneren Lagrange-Punkt von Sonne und Erde (L1) installiert werden, da sie dort durch die ausbalancierten Anziehungskräfte von Sonne und Erde auf einer festen Position gehalten werden könnte. Dort wäre sie ungefähr 2,4 Millionen Kilometer von der Erde entfernt, ungefähr sechsmal so weit wie der Mond. Durch diese Entfernung würde ein Sonnenschild keinen direkten Kernschatten mehr auf die Erde werfen, sondern eher einen diffusen Halbschatten, der gleichmäßig über den gesamten Globus reichen würde. Für einen derart großen Schatten müsste das Sonnenschild ein bis zwei Millionen km² groß sein, wobei es bestenfalls aus vielen großen Sonnensegeln zusammengesetzt wäre (PSF, 2023).

In den letzten Jahren gab es einzelne Weltraum-Missionen, bei denen Sonnensegel als treibstofffreies Fortbewegungsmittel für Satelliten erprobt wurden. Ein 2022 in den Weltraum eingebrachtes Sonnensegel der NASA-Mission „NEA Scout“ hatte eine Größe von 86 m² (Lockett et al., 2020). Die NASA hat zuletzt in der Mission „Solar Cruiser“ ein 1.700 m² großes Sonnensegel erfolgreich gebaut. Dieses Segel soll am L1-Punkt platziert werden und beweisen, dass sich eine derartige Installation für lange Zeit stabil an einer Position halten könnte. Der Start der Rakete war für 2025 geplant, wurde jedoch wegen zeitlicher Probleme und Kostengründen vorerst auf 2028 verschoben (Johnson et al., 2023). Auch wenn es bei der Erprobung von Sonnensegeln eigentlich nicht um SRM geht, wären die Forschungsergebnisse für die Weiterentwicklung eines SRM-Sonnenschildes essenziell. Deshalb fordert die Planetary Sunshade Foundation (PSF) die US-amerikanische Regierung auf, diese Mission voll zu finanzieren und durchzusetzen (PSF, 2023).

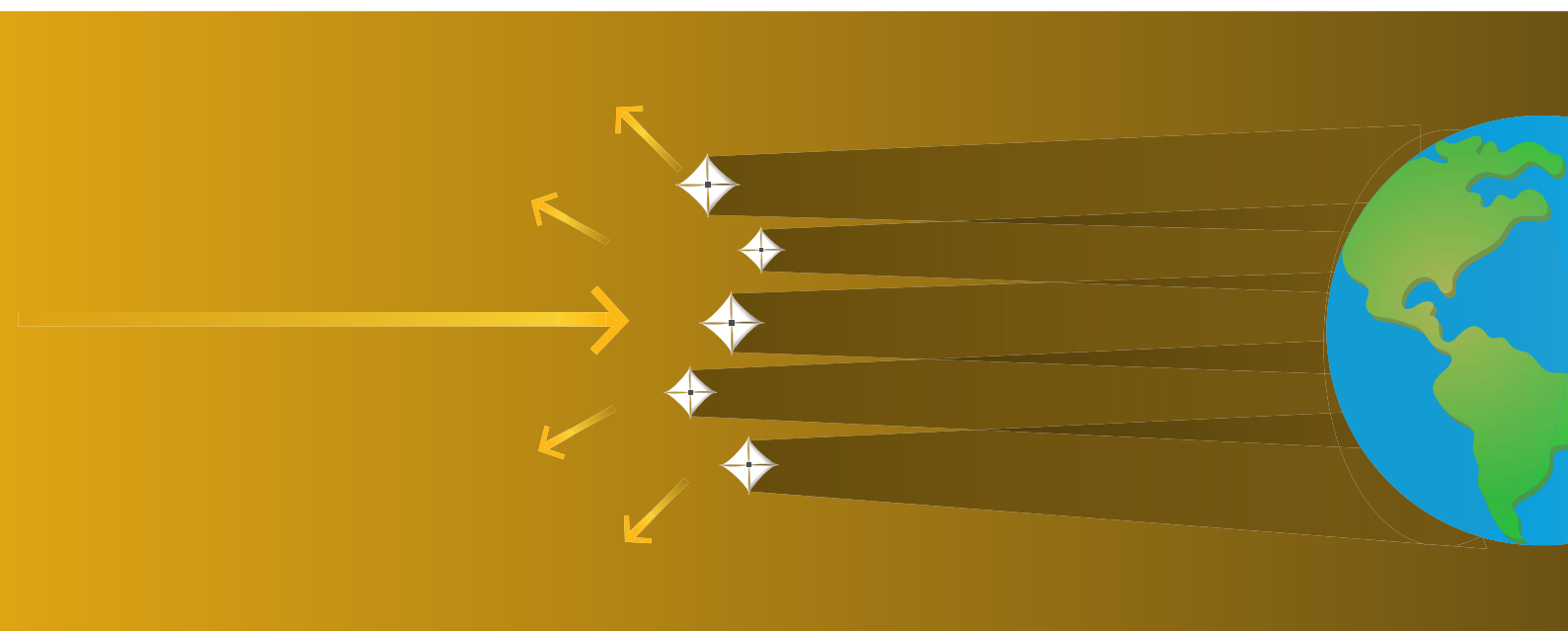
Das vor über zwanzig Jahren entwickelte Material der Sonnensegel besteht aus einer extrem dünnen Plastikfolie, die mit Aluminium überzogen ist. Diese reflektierende Segelmembran könnte auch für Segel, die größer als 10.000 m² sind, genutzt werden (NASA, 2024) und wäre somit für SRM-Zwecke geeignet. Ein Sonnenschild, das die Erdtemperatur um 1 °C senken könnte, bestünde aus schätzungsweise sieben bis hundert Millionen Tonnen Material (PSF, 2023). Um diese Massen ins Weltall zu transportieren, wären tausende Raketenstarts über mehrere Jahrzehnte nötig. Daher gibt es Überlegungen, nur das Grundkonstrukt auf der Erde zu bauen und mit Raketen ins All zu transportieren. Die Rohmaterialien sollen direkt in einem Bergbaubetrieb auf dem Mond oder von Asteroiden abgebaut und im Weltraum verarbeitet werden, weil Raketenstarts vom Mond weniger Treibstoff verbrauchen würden (Scott et al., 2022; Bewick et al., 2011). Doch selbst wenn Material auf dem Mond abgebaut werden könnte, wären immer noch eine Vielzahl an Raketenstarts von der Erde notwendig, die erhebliche Mengen Wasserdampf, ggf. CO₂ und Stickoxide freisetzen, die die Erderwärmung und den stratosphärischen Ozonabbau antreiben (Roy, 2022).

Um diese Industrie schneller und billiger zu machen, müsste auch in Weltraum-Logistik, wie Tankstellen und Treibstoffproduktion, investiert werden (NSTC, 2022). Um die Materialkosten zu verringern und die Position des Schildes zu stabilisieren, wäre eine Leine denkbar, an deren Sonnenseite ein Gegengewicht hängt. Wäre dieses mit Solaranlagen ausgestattet, könnte man die Länge des Seils flexibel an bestimmte Situationen anpassend, z. B. Sonnenwinde. Zudem würde es als Sicherheitsvorkehrung dienen, damit ein defektes Sonnenschild in Richtung Sonne gezogen würde, anstatt auf die Erde zu stürzen, wo es verheerende Folgen haben könnte. Derart robuste, lange Seile existieren jedoch nicht (Szapudi, 2023).

Da die Konstruktion einer solchen Megastruktur viele Jahrzehnte dauern würde, ist sie keine Sofortmaßnahme gegen den Klimawandel. Stattdessen könnte ein Sonnenschild kurzfristige, nicht für einen dauerhaften Einsatz geeigneten Methoden wie Stratosphärische Aerosolinjektion (Kap. 6.2 zu SAI) ablösen. Ein Sonnenschild wird als nachhaltige, permanente Lösung dargestellt (PSF, 2023). Gleichzeitig werden die Strukturen als reversibel angegeben, da man sie einfach in die Weiten des Weltalls treiben lassen und die Kühlung damit rückgängig machen könnte (Baum et al, 2022). Ein plötzliches Entfernen eines Sonnenschildes, sei es bewusst oder ein Unfall, würde jedoch zum Termination Shock (Kap. 4) führen (PSF, 2023). Daneben ist es ethisch und technisch bedenklich, eine solche Megastruktur einfach im Weltraum zu entsorgen. Weltraumschrott ist bereits jetzt ein ernstzunehmendes, rasant wachsendes Problem (ESA, 2023).

Die Planetary Sunshade Foundation setzt die Weiterentwicklung dieser Methode in den Rahmen eines Wettrennens um den Weltraum. Sie bewirbt das Projekt mit der Aussage, die Vorreiter-Staaten von Mond-Bergbau und Weltraumlogistik könnten den gesamten wirtschaftlichen Vorteil für sich beanspruchen (PSF, 2023). Diese Denkweise fördert neokolonialistische Strukturen und Machtgefälle, die auch außerhalb der Erde weitergeführt und sogar verschärft würden, weil der finanzielle Vorteil nicht nur bei den Industriestaaten, sondern bei einzelnen Raumfahrtmächten liegen würde. Klimaschutz erscheint hier deshalb nur als eine vorgeschobene Motivation.

Neben dem Sonnenschild existieren weitere Vorschläge für weltraumbasiertes SRM, etwa Ringe aus Mond- oder Asteroidenstaub, Glasschilde, Spiegel und sonstige Reflektoren, die sowohl im erdnahen Orbit als auch an weiteren Lagrange-Punkten installiert würden (Baum et al, 2022; Bewick et al, 2013). Staubwolken beispielsweise wären weniger aufwendig in der Herstellung, jedoch schwer zu regulieren. Je nachdem auf welcher Umlaufbahn sie kreisen, würden sie nur zeitweise vor der Sonne liegen, dann aber viel mehr Strahlung abhalten als erwünscht. Erdnahe Installationen bergen die Gefahr der Kollision mit Satelliten und Weltraumschrott. Zudem wäre ihr wechselnder Schattenwurf deutlich wahrnehmbar und würde Pflanzenwachstum und Leben auf der Erde beeinflussen (Bewick et al., 2011). Die Ideen basieren teilweise auf sehr wenigen, einzelnen Beobachtungen. Einmal hat sich beispielsweise die Venus kurzzeitig zwischen Sonne und Erde geschoben, jedoch zu kurz, um einen messbaren Temperatureinfluss zu haben (PSF, 2023). Und während der kleinen Eiszeit vor ein paar Jahrhunderten sorgte eine verminderte Sonnenfleckenaktivität für kältere Winter (Baum et al, 2022).



6.2 Stratosphärische Aerosolinjektion

Wird über SRM diskutiert, dann ist oftmals das Ausbringen von Aerosolen in der Stratosphäre, also in ca. 20 km Höhe, gemeint, englisch Stratospheric Aerosol Injection (SAI) (HBS, 2021a). SAI ist der populärste Ansatz, da die gewünschte kühlende Wirkweise aus der von Vulkanausbrüchen abgeleitet wurde (Kap. 3.3). Bisher basiert die Forschung insbesondere auf diesen Analogien und Computermodellen (Kap. 7.1), Freilandexperimente wurden verhindert (Kap. 7.2).

Aerosole können kühlende oder wärmende Eigenschaften haben, je nach stofflicher Zusammensetzung und Höhe. Bei SAI sollen Chemikalien, die durch ihre Eigenschaften mehr Sonnenstrahlung ins Weltall reflektieren, in der Stratosphäre ausgebracht werden und so die Albedo des Planeten erhöhen. Von dem Ausbringungsort würden sie sich über die weltumspannenden Windsysteme über den gesamten Globus verteilen und so das Klimasystem verändern (Kap. 4) (Baur et al., 2024).

Am besten verstanden ist die Wirkung von Schwefeldioxid (SO₂), das mit atmosphärischen Wassermolekülen reagiert und Sulfataerosole bildet. Da die erheblichen negativen Auswirkungen von Sulfataerosolen allerdings hinlänglich bekannt sind, werden auch andere Stoffe, wie Calcit, Ruß, Titandioxid, Zirconiumdioxid, Aluminiumoxid und Diamantenstaub diskutiert und in Laboren untersucht (Vukajlovic, 2021; Smith, 2020). Die Wirkung dieser künstlich hergestellten **Chemikalien** könnte besser steuerbar sein als die von SO₂ und Schwefelsäure (Lawrence et al., 2018). Sie bergen jedoch, wie Sulfataerosole auch, das Risiko, die Stratosphäre um mehrere Grad Celsius zu erwärmen (Lawrence et al., 2018; Jones et al., 2016). Aktuell basieren auch weiterhin die meisten Aussagen auf der Annahme von Sulfataerosolen (Brody et al., 2024).

Im Fall von Sulfataerosolen ist der resultierende **Ozonabbau** hinreichend untersucht. Sie greifen in die chemischen Prozesse des Ozonaufbaus ein und mindern somit die Konzentration von stratosphärischem Ozon (Drdla und Müller, 2012). Darüber hinaus führen die Absorptionseigenschaften der Sulfataerosole zu einer Erwärmung der Stratosphäre, was zu Änderungen von atmosphärischen Strömungen wie der Brewer-Dobson-Zirkulation und der Quasi-biennalen Oszillation führt und so die globale

Verteilung des Ozons stört (UBA, 2016). Die Änderung der Stratosphärenchemie hat auch Einfluss auf Methan und Stickoxide, Wasserdampf und Wolkendynamiken (IPCC, 2018). Die Beeinträchtigung der vor schädlicher UV-Strahlung schützenden Ozonschicht und die damit einhergehende Vergrößerung des Ozonlochs, insbesondere über der Antarktis, stellt eine Bedrohung für die Biosphäre im Allgemeinen und die menschliche Gesundheit im Speziellen dar.

Ein weiteres Umwelt- und **Gesundheitsrisiko**, das bisher als erfolgreich beseitigt gilt, wäre die Wiederkkehr sauren Regens, wenn die Sulfataerosole aus der Atmosphäre ausgewaschen werden. Jede zusätzliche Säuredeposition ist eine Belastung für Ökosysteme (Schäfer et al., 2015; Robock, 2008).

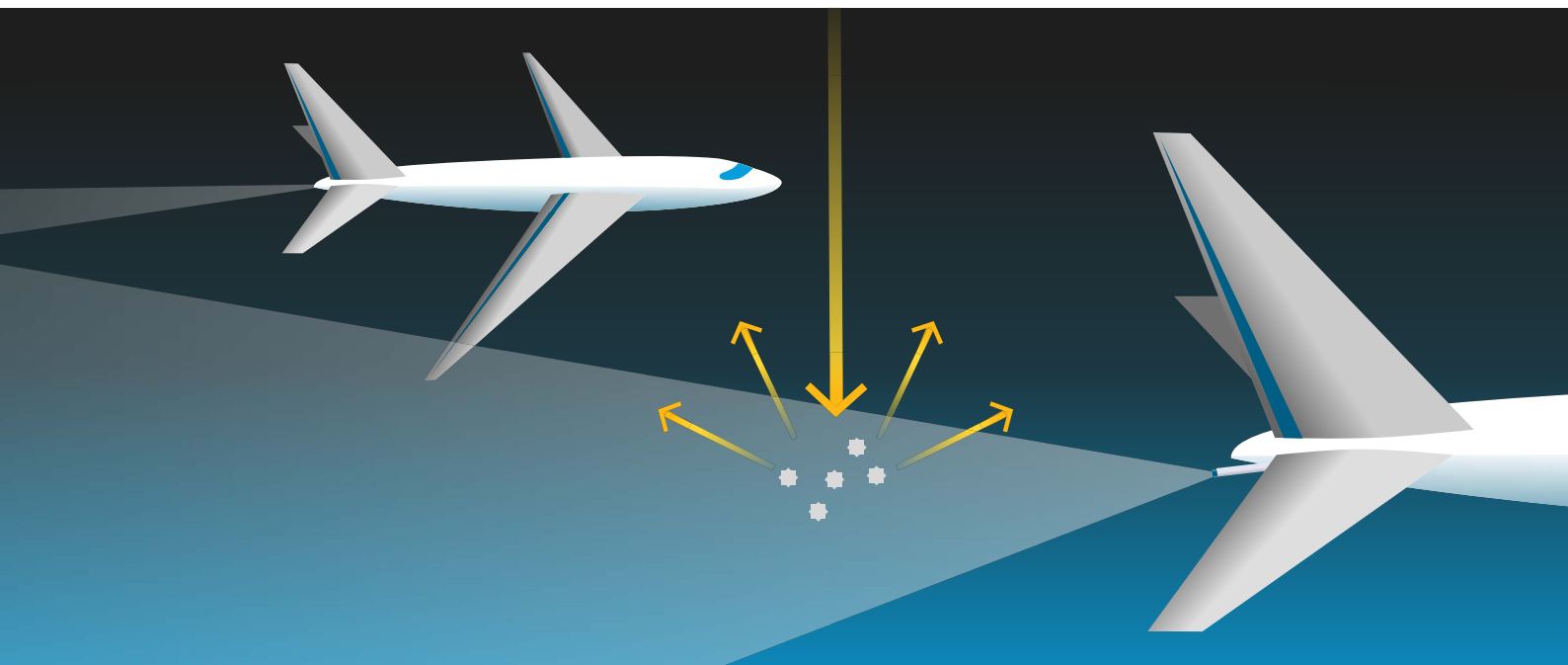
SAI führt außerdem dazu, dass weniger sichtbares Licht auf der Erdoberfläche eintreffen würde als jetzt. Dieser Effekt würde einer „Verschattung“ ähneln und den Himmel dauerhaft milchig weiß erscheinen lassen, was nicht zu vernachlässigende Auswirkungen auf die menschliche psychische Gesundheit hätte (PSF, 2023; Robock, 2008).

Aerosole verbleiben nur wenige Jahre oder Monate in der Stratosphäre. Beim Absinken haben die Aerosole Einfluss auf die Zusammensetzung von Zirruswolken und damit gegebenenfalls einen unerwarteten zusätzlichen kühlenden oder wärmenden Effekt (Kap. 6.3)(Robock, 2008; Kuebbeler et al., 2012).

Auf Grund der nur temporären Wirkung müssten also kontinuierlich, über Jahrhunderte, Aerosole hergestellt und ausgebracht werden (Neuber et al., 2020). Dazu kämen zwar auch Ballone oder Raketen in Betracht, vor allem aber **Flugzeuge**. Normale Verkehrsflugzeuge oder Jets können nicht in 20 km Höhe fliegen und wären auf Grund ihrer Form nicht für SAI geeignet. Es bräuchte hunderte speziell angefertigter Flugzeuge (Smith, 2024; Smith et al., 2018). Zudem bräuchte es eine Infrastruktur, damit diese Flotte kontinuierlich landen, tanken und wieder starten könnte. Die Bauweise von SAI-Flugzeugen wird in Studien detailliert beschrieben (Bingaman et al., 2020; Janssens, 2020).

Für eine Absenkung der globalen Durchschnittstemperaturen um 1 °C müssten jährlich ca. 8 bis 16 Millionen Tonnen SO₂ ausgebracht werden (WMO, 2022). Würde man hierfür auf Luftbetankungsflugzeuge zurückgreifen, wären für 8 Millionen Tonnen SO₂, konservativ geschätzt, etwa 137.000 Flüge pro Jahr notwendig. Eine Studie geht davon aus, dass im ersten Jahr 4000 Flüge stattfinden und 15 Jahre später 60.000 **Flüge pro Jahr** (Smith et al., 2018). Da derzeit keine Alternative zu auf fossilen Brennstoffen basierendem Kerosin in ausreichender Menge verfügbar ist, würden diese Flüge am Ende sehr viele Emissionen verursachen und den theoretisch kühlenden Effekt

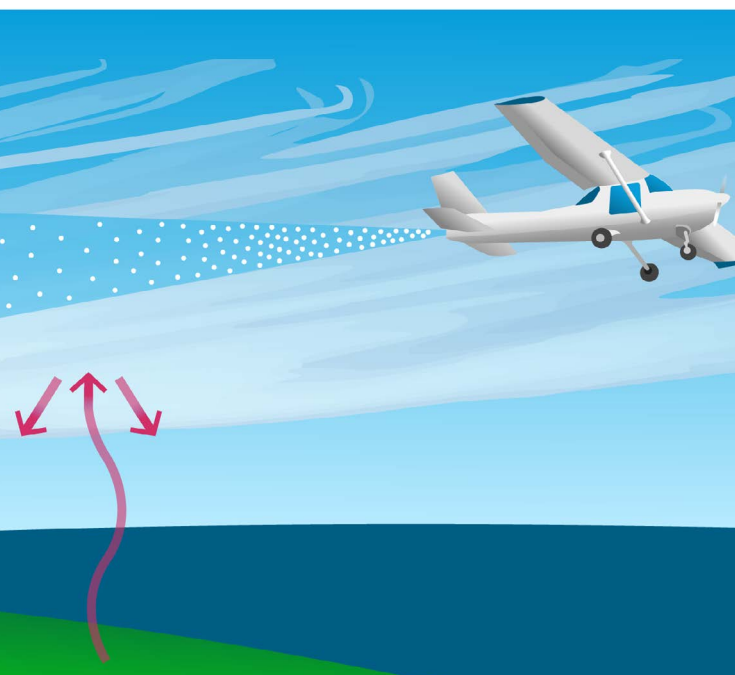
der ausgebrachten Aerosole zunichtemachen. Außerdem würde die Ozonschicht in einem Maße geschädigt werden, wie dies zur größten Ausdehnung des Ozonlochs Mitte der 1990er Jahre der Fall war (WMO, 2022). Darüber hinaus stellt sich die Frage nach der Beschaffung von SO₂, da die natürlichen Vorkommen begrenzt sind. Die künstliche Herstellung basiert auf der Erdölindustrie (Muraca et al., 2018; Brovkin et al., 2008). Die Produktion von SO₂ selbst würde demnach Treibhausgasemissionen verursachen, die ebenfalls ausgeglichen werden müssten.



6.3 Ausdünnen von Zirruswolken (Cirrus Cloud Thinning)

Zirruswolken (auch Zirren, Eis- oder Federwolken genannt) liegen höher als andere Wolkenformen. Sie befinden sich meist in der oberen Troposphäre, also in ca. 5–13 km Höhe. Auf Grund der dort herrschenden Kälte bestehen sie nicht aus Wassertropfen, sondern aus Eiskristallen. Die Eigenschaften von Zirren führen in der Regel dazu, dass die langwellige Wärmestrahlung daran gehindert wird, ins Weltall zu gelangen (Kap. 3.1). Sie haben also überwiegend einen wärmenden Effekt. Bei dem SRM-Ansatz namens Cirrus Cloud Thinning (CCT) sollen die Zirren ausgedünnt werden, damit mehr Wärmestrahlung ins All entweichen kann und so ein kühlender Effekt entsteht (Tully et al., 2021). Da dieser Ansatz anders als die anderen SRM-Ansätze nicht auf der Veränderung der Sonnenstrahlung basiert, ordnet man diesen teilweise auch unter der Rubrik „Radiation Modification“ ein.

Die Idee hinter CCT ist, dass mehr größere Eiskristalle erzeugt werden, statt vieler kleiner. Dadurch würde weniger Wärmestrahlung zurückgehalten. Dazu müssten zusätzliche Partikel, (wie beispielweise Sulfat, Flugzeugruß oder Mineralstaub) als Kondensationskerne in diesen Höhen ausgebracht werden (Tully et al., 2021). Zirren wären mit 8–13 km Höhe für Verkehrsflugzeuge erreichbar. Wenn die Menge an benötigten Kondensationskeimen nicht zu groß ist, bräuchte man also keine speziellen Flugzeuge für



CCT. Die benötigte Masse an auszubringenden Partikeln wird auf einige Kilogramm pro Flug geschätzt (DFG, Website).

In der Wissenschaft bestehen zur Entstehung, Dynamik und Zusammensetzung von Wolken insgesamt noch große Unsicherheiten. So sind Aussagen über eine Manipulation der Wolken mit noch größerer Unsicherheit behaftet. Die Forschung zu CCT basiert derzeit hauptsächlich auf Modellen (Kap. 7.1), die hinsichtlich einer CCT-Modifikation ähnliche Auswirkungen wie bei SRM generell zeigen, zum Beispiel einen veränderten Wasserkreislauf (Tully et al., 2021; Storelvmo et al., 2013). Daneben gibt es Laborexperimente in sogenannten *cloud chambers* (Steinke et al., 2024).

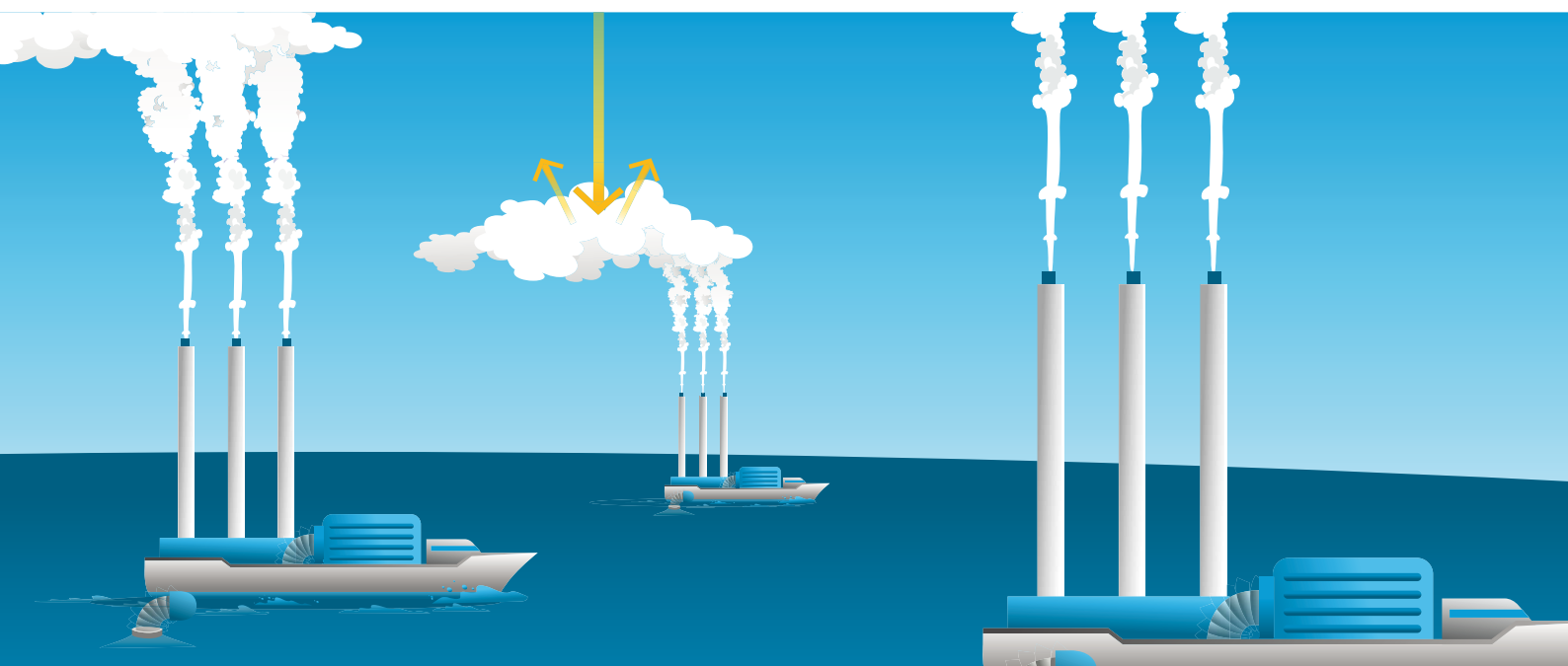
Wann und wo sich Zirren bilden, ist schwer vorherzusagen, sodass CCT sich nicht für einen kontinuierlichen und globalen Einsatz eignet (Caldeira et al., 2017). Es wird vor allem Durchführung an den Polen diskutiert, weil dort die Luft natürlicherweise weniger Partikel enthält (Gruber et al., 2019). Gleichzeitig sind die Polarregionen stark durch den Klimawandel gefährdet und das Schmelzen des Eises in Antarktis und Arktis führt zur Verringerung der Albedo, was wiederum die Erwärmung antreibt. Insbesondere während der Polarnacht ist der wärmende Effekt von Zirren besonders ausgeprägt, da der kühlende Anteil durch die Reflexion der Sonnenstrahlung, wegfällt (DFG, Website). Es ist jedoch zu beachten, dass auch die Polarregionen Teil des komplexen Klimasystems sind und Windzirkulationen und Wasserkreislauf dafür sorgen, dass die Effekte auch außerhalb der Pole wirken würden. Gelangen die Partikel in wolkenlose Luftmassen hoher Luftfeuchtigkeit, können sich dort zusätzliche Zirren mit wärmendem Effekt bilden (HBS, 2021b).

Ist die Menge an ausgebrachten Kondensationskernen zu groß, können sich zu viele Eiskristalle bilden. Das hätte den gegenteiligen Effekt: Die Zirruswolke würde noch mehr Wärme in der Atmosphäre halten als vorher. Dieser gegenteilige Effekt könnte zweckentfremdet werden, um z. B. das Meereis am Nordpol bewusst zu schmelzen und so Schiffsrouten zu erschließen. Wo genau der Grenzwert der Partikelmenge liegen würde, ist nicht bekannt (HBS, 2021b).

6.4 Aufhellen mariner Wolken (Marine Cloud Brightening)

Wolken bestehen aus Millionen kleinster Wassertröpfchen. Für ihre Entstehung spielen neben Temperatur und Luftfeuchte kleinste Partikel, wie Sandkörner, Salzkristalle oder Staub (so genannte Kondensationskerne), an denen Wasser kondensieren und sich Tröpfchen bilden können, eine wesentliche Rolle. Der Gehalt an Wassertröpfchen bestimmt die Reflexionseigenschaften von Wolken und damit ihre Albedo. Beim sogenannten Marine Cloud Brightening (MCB), der Aufhellung mariner Wolken, sollen bestehende Stratocumulus-Wolken in der unteren Troposphäre heller gemacht werden, damit an deren weißer Oberfläche mehr Sonnenstrahlung reflektiert wird (Posner et al., 2023; HBS, 2021c; Latham 1990). Die maritime Atmosphäre ist in der Tendenz sauberer und staubfreier. Eine künstliche Anreicherung der maritimen Atmosphäre mit Kondensationskernen könnte deshalb die Wolkenalbedo merklich erhöhen, weil sich dann erheblich mehr und kleinere Tröpfchen bilden würden, die das Sonnenlicht stärker streuen und zurückwerfen würden (Latham et al. 2012). Durch Schiffe könnten geeignete Partikel, die als Kondensationskerne wirken, ausgebracht werden. Hierzu würde der Salzgehalt des Meerwassers genügen, sodass keine zusätzlichen Chemikalien nötig wären (allerdings werden die Eigenschaften anderer Stoffe dennoch untersucht, z. B. paraffinähnliche Öle, Russel et. al 2013).

Da Wolken räumlich unregelmäßig verteilt sind und ihre Lebensdauer beschränkt ist, müsste die Freisetzung der Partikel jedoch in größerer Menge, mit ausreichender räumlicher Verteilung und häufig wiederholt erfolgen. Weil die erzeugten Wolken sich nach wenigen Stunden oder Tagen auflösen würden, gehen Studien von 10.000 bis 100.000 benötigten Schiffen aus, die kontinuierlich Salzpartikel versprühen, um einen signifikanten Effekt zu erzielen (Clausen et al., 2024; DFG, XXXX). Um die globale Durchschnittstemperatur um 1 ° zu senken, berechnen Studien die Notwendigkeit von 70 Millionen Tonnen trockenen Seesalzes pro Jahr (IPCC, 2018). Weil Schiffe nur mit begrenzt hohen „Schornsteinen“ ausgerüstet werden, müssten natürliche Aufwinde genutzt werden, um das Meerwasser in eine Höhe von mehreren Hundert Metern bis zwei Kilometern zu bringen (DFG, XXXX). Diese riesige (autonom fahrende) Schiffflotte würde Unmengen an Schiffstreibstoff benötigen, der bisher aus fossilen Brennstoffen gewonnen wird, sodass zusätzliche Emissionen entstehen würden, die die Erderwärmung weiter antreiben und durch MCB erstmal ausgeglichen werden müssten. Es bräuchte also zunächst die Entwicklung autonom fahrender, auf erneuerbaren Energien basierender Spezialschiffe. Auf Grund dieser Probleme von MCB werden auch Drohnen diskutiert, die statt Meersalz optimierte synthetische Salze transportieren sollen, um Menge und Energie zu sparen (Clausen et al., 2024).



Eine der wichtigsten Auswirkungen, sind die Veränderungen der Lichtintensität und der Temperatur in der Nähe des Einsatzortes, die sich negativ auf eine Reihe von Prozessen in der Atmosphäre und im Ozean auswirken können. So kann z. B. das Wachstum des Phytoplanktons im Ozean in Folge der Beschattung abnehmen. Außerdem wird die Durchmischung des oberen Ozeans durch eine starke lokale Abkühlung verstärkt, was wiederum die Nährstoffzufuhr verändert und Auswirkungen auf die biologische Vielfalt und die Ökosysteme hat. Weitreichende Veränderungen in der Wassersäule, den Nahrungsnetzen und den biogeochemischen Kreisläufen sind zu erwarten, die auch die Fähigkeit des Ozeans zur Kohlenstoffbindung beeinträchtigen könnten (GESAMP 2019).

Die regionale Veränderung des Strahlungshaushalts und Wasserkreislaufs hat grenzüberschreitende, weltweite Folgen für die Atmosphäre und für die Meere durch die indirekten und komplexen Zusammenhänge mit Meeres- und Windzirkulationen (Lockyer et al., 2019, Possner et al. 2023). So hat MCB etwa Auswirkungen auf den Anstieg des Meeresspiegels, der auf einer Seite der Erde zwar zurückgehen, auf der anderen dafür umso drastischer ausfallen könnte (Haywood et al., 2023). Für MCB gilt, wie für SRM insgesamt: Nur weil sich rechnerisch die globale Durchschnittstemperatur senken lässt, ist die Temperatur nicht gleichmäßig verteilt und die regionalen Auswirkungen können unterschiedlich sein. Dies ist bei MCB ein Problem, weil die THG zwar weltweit und rund um die Uhr wirken, während MCB nur regional und lediglich tagsüber wirksam wäre. Die daraus resultierende Unsicherheit der Studienergebnisse wird durch ungewisse Zusammenhänge, beispielweise mit der Ozeanzirkulation, verstärkt (Ricke et al., 2023). Insgesamt basiert das Prinzip von MCB auf theoretischen Überlegungen und Computermodellen (Possner et al. 2023).

Diskutiert und erprobt wird, ob ein kleinräumiger Einsatz von MCB nützlich sein kann, um lokal etwa Wirbelstürme abzuschwächen oder Korallenriffe vor einer zu starken Erwärmung zu schützen (Wanser 2017). Zu diesem Zweck wird MCB bereits am Great Barrier Reef in Australien erforscht (Tollefson, 2021). Das derzeitige Freilandexperiment in Australien findet auf einem Schiff statt, auf dem ein Zerstäuber installiert ist. Dieser hat eine Vielzahl kleiner Sprühköpfe, die das Meerwasser in winzig kleine Partikel trennen und diese extrem schnell versprühen. Diese speziell entworfenen Sprühköpfe gleichen denen der Wettermodifikation (s. Textbox). Bei anderen Chemikalien als Meersalz bräuchte es dementsprechend angepasste Sprühköpfe, was eine ingenieurtechnische Herausforderung darstellt (Wanser 2017).

Zudem ist Präzision wichtig. Sind die Partikel zu klein oder zu groß, kann es zu Verdunstung oder Regen kommen, was die Wolke auflösen und so den gegenteiligen Effekt haben könnte (Feingold et al., 2024). Dementsprechend sind Ort und Zeitpunkt der Injektion und das Vorhandensein von Stratocumulus-Wolken ebenfalls entscheidend (Possner et al. 2023).

Exkurs: Wettermodifikation

Methoden zur Wettermodifikation, auch als Cloud Seeding oder Rain Enhancement bekannt, weisen große Ähnlichkeit zu CCT und MCB auf. Während CCT und MCB als SRM-Maßnahmen dazu beitragen sollen, das globale Klima langfristig zu verändern, soll Wettermodifikation nur lokal und kurzzeitig wirken. Durch Wettermodifikation soll beispielsweise Regen- oder Schneefall gefördert oder schwere Gewitter verhindert werden. Dafür wird beispielsweise Silberiodid, Bleiodid oder Kupfersulfid verbrannt oder Salzwasser versprüht, sodass kleine Partikel entstehen (Gekkieva et al., 2021). Je nachdem ob vorher schon eine (Gewitter-)Wolke oder klarer Himmel vorhanden war, kann so die Bildung großer Hagelkörner verhindert, die Bildung von Regentropfen angeregt oder die Entstehung einer neuen Wolke gefördert werden. Die Wirkung ist noch nicht ganz gesichert, da es schwer zu beurteilen ist, ob es nicht auch ohne den Zusatz zu dem Wetterereignis gekommen wäre.

Ebenfalls zu untersuchen sind der Umwelteinfluss der ausgebrachten Chemikalien und die Wirkung in Nachbarländern. Nichtsdestotrotz wird Wettermodifikation weiterentwickelt und eingesetzt. China beispielsweise hat seit 2021 ein Zentrum speziell zur Wetterbeeinflussung (Simon et al., 2023) und die Vereinigten Arabischen Emirate haben seit 2015 ein umfangreiches Förderprogramm für Freilandexperimente zur Regenförderung (www.uaerep.ae; Hosari et al., 2021). In Deutschland und Europa werden seit einigen Jahrzehnten Flugzeuge zur Hagelabwehr eingesetzt (Svabik, 1989). Die Weltorganisation für Meteorologie (WMO) hat ein Expert*innenteam zur Wettermodifikation, das einen Bericht zum Entwicklungsstand veröffentlicht hat (Flossmann et al., 2019; WMO, 2018). Auf Grund der Ähnlichkeiten zwischen Wettermodifikation und SRM stellt sich die Frage, ob die Forschungsergebnisse und Infrastruktur letztendlich auch für SRM genutzt werden könnten (Bluemling et al., 2020).



6.5 Erhöhung der Oberflächen-Albedo

Es gibt eine ganze Bandbreite von Ansätzen bei denen die Albedo (Kap. 3.2) von bestimmten Oberflächen erhöht werden soll. Dazu können weiße Farben oder reflektierende Materialien an Land, im Wasser, in Städten, in Wüsten oder auf Eis ausgebracht werden. Der systematische, großflächige Einsatz dieser an sich kleinskaligen Methoden hätte Einfluss auf das globale Klima.

Weißer Städte und helle Äcker

Insbesondere in Städten gibt es viele dunkle und damit warme Flächen. Dächer und Straßen machen einen Großteil der Oberflächen aus. Dementsprechend vielversprechend klingt es sämtliche Asphalt- und Dachflächen weiß zu färben. Durch die schiere Menge an urbaner Fläche soll so der Klimawandeleffekt der gesamten weltweiten CO₂-Emissionen ausglich werden können (Akbari et al., 2008). Wichtig zu bedenken ist jedoch, dass es sich dabei um keine nachhaltige Maßnahme handeln würde. Die schnell verschmutzten Flächen müssten wieder und wieder neu gestrichen werden. Die dafür verwendeten Farben könnten Boden und Grundwasser belasten, wenn sie massenhaft direkt auf der Straße ausgebracht werden. Dächer zu weißeln ist in Gegenden, in denen es im Winter lange dunkel ist und wo ohnehin oft Schnee liegt, nicht effizient. Dafür ist es in warmen Gegenden von Vorteil, dass die gekühlten Gebäude weniger Energie für Klimaanlage benötigen (Tzempelikos et al., 2021; Oleson et al., 2010). Insgesamt kühlt sich durch die weißen Gebäude die Umgebungstemperatur

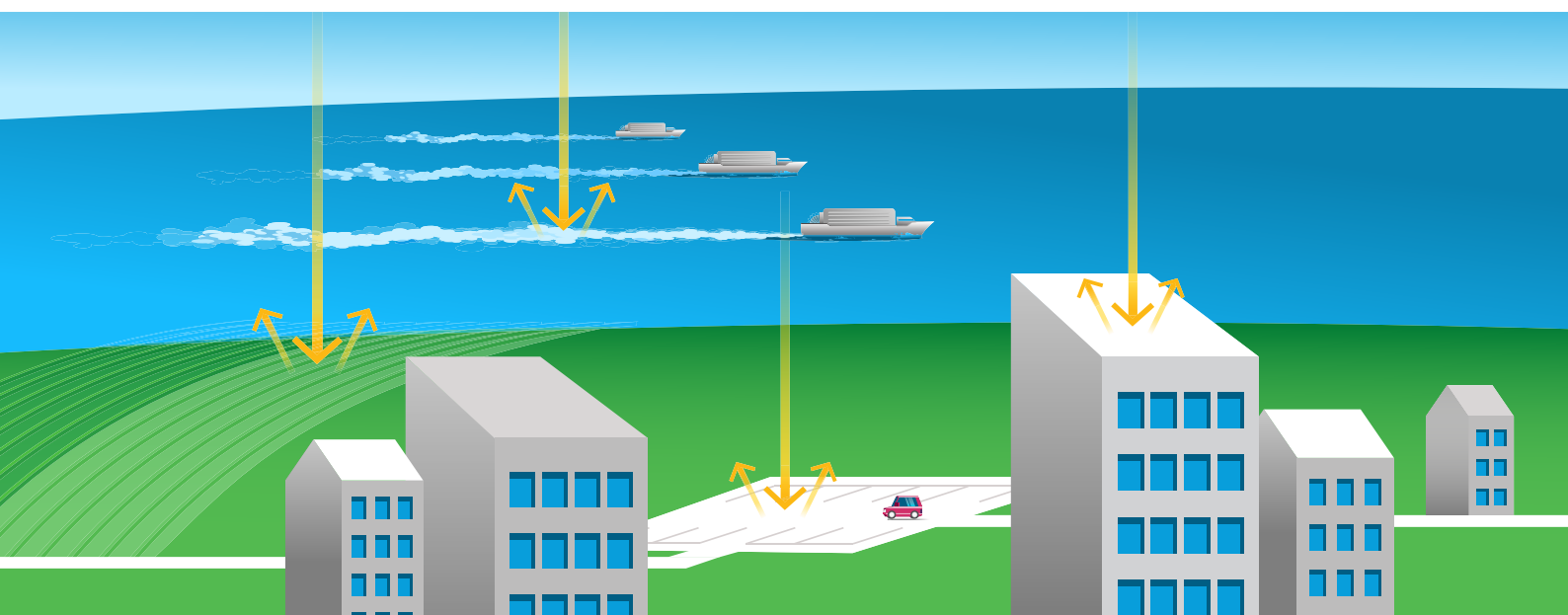
ab. Daher hat New York bereits zahlreiche Dächer und Los Angeles einige Straßen in Pilotprojekten weiß gestrichen. Diese Maßnahmen sind jedoch keine SRM-Experimente, sondern zielen darauf ab, das globale Klima zu verändern, sondern sollen dem Wärmeinseleffekt von Städten entgegenwirken (siehe Textbox) (Frie et al., 2022).

Nicht ganz weiß, aber zumindest heller könnten auch forst- und landwirtschaftliche Flächen sein. Unterschiedliche Arten der Bodenbearbeitung, aber insbesondere die Auswahl hellerer Pflanzen werden diskutiert. Einige Sorten beinhalten weniger Chlorophyll oder haben mehr reflektierende Wachsschichten auf den Blättern oder günstige Wuchsformen der Kronendächer. Sie können dahingehend verstärkt gezüchtet oder genmanipuliert werden (Genesio et al., 2020; Morton, 2009; Ridgeway et al., 2009)

Theoretisch könnte man den Ansatz des Weißens auf jede Oberfläche übertragen. So gibt es Ideen auch die Wüste mit weißer Folien abzudecken, was das gesamte Ökosystem zerstören könnte (HBS, 2021d). Ein Unternehmen bietet an, mit Aluminium beschichtete Sandsäcke in der Wüste zu verteilen (<https://lumobag.com/>). Niedergelegte Sandsäcke oder Folien können durch Sandstürme im Sand untergehen und würden umfassender Pflege bedürfen.

Kielwasseraufhellung und Mikrobläschen-Schaum

Da gerade der Ozean eine große, dunkle Fläche mit niedriger Albedo ist, gibt es die Idee, diesen mit



weißem Schaum aus Mikrobubbles (engl.: micro-bubbles) zu überziehen. Es würden Maschinen gebraucht, die eigens dafür da wären, kontinuierlich Mikrobubbles zu produzieren. Der Schaum im Kielwasser großer Schiffe könnte zudem mit Chemikalien (z. B. Tensiden) versetzt und so über Wochen und Monate haltbar gemacht werden. Würde dies großflächig umgesetzt werden, wäre ein gigantischer Teil des größten zusammenhängenden Ökosystems der Welt von einer Versorgung mit Licht abgeschnitten. Eine durchgängige Decke aus Schaum würde neben dem Lichteinfall auch die Sauerstoffzufuhr verringern und damit das ganze marine Nahrungsnetz gefährden. Zudem könnten die ausgebrachten Tenside giftig sein. Das gesamte marine Ökosystem wäre durch die Veränderungen bedroht. Die Ozeane spielen im Kohlenstoffkreislauf der Erde eine ganz wesentliche Rolle, da sie Kohlendioxid aus der Atmosphäre aufnehmen und speichern. Vielfältige Funktionen der Ozeane würden bei großflächiger Anwendung dieser Methode maßgeblich beeinträchtigt werden, einschließlich der Funktion zur Speicherung von Kohlendioxid (Robock 2011). Die Methode könnte dadurch auch den Klimawandel verschlimmern. Zudem würden die benötigten Schiffe und Maschinen zusätzliche THG-Emissionen verursachen, da emissionsfreie Antriebsstoffe für Schiffe derzeit nicht in großem Maße zur Verfügung stehen. Es ist dazu unklar, ob der Ansatz überhaupt funktionieren könnte, da die Bakterien im Ozean die Mikrobubbleschicht beschädigen würden (Minunno et al., 2023; HBS, 2021e; Zhao et al., 2020; Ortega et al., 2018; Gabriel et al., 2017; Crook et al., 2016).

Ausbringung reflektierender Partikel auf dem Meer und auf Eisflächen

Bei einem ähnlichen Ansatz sollen reflektierende Materialien, wie etwa kleinste Glaskügelchen, auf den Eisflächen und im Ozean ausgebracht werden (Johnson et al., 2022). Die massenhafte Erzeugung von Kunstschnee durch riesige Maschinen und die Ausbreitung großer weißer Plastikfolien oder die Anregung von Algenblüten (z. B. Coccolithophoren) werden ebenfalls diskutiert (Farkas et al., 2023; Feldmann et al., 2019; GESAMP 2019; Field et al., 2018). Es wären negative Umweltauswirkungen durch die Eigenschaften der ausgebrachten Materialien zu erwarten (GESAMP 2019). Plastikmüll im Meer ist eines der offensichtlichen Probleme. Die ausgebrachten Materialien und ihre Degradationsprodukte könnten auch toxisch sein und sich in der Nahrungskette anreichern.

Die Idee, reflektierende Partikel auf der Meeresoberfläche auszubringen steht in starkem Widerspruch zur Umweltpolitik, die zum Ziel hat die Einträge von Nährstoffen, Schadstoffen und Müll in die Meere zu reduzieren. Hinzu kommt ein rein praktisches Problem. Um den Effekt auf die Albedo in vollem Umfang zu gewährleisten, müssten die reflektierenden Flächen frei von Verschmutzungen und Bewuchs sein. Die dafür nötigen Reinigungen würden zusätzliche Kosten sowie Chemikalieneinträge verursachen und erforderten außerdem einen hohen technischen Aufwand. Weitere Umweltauswirkungen wären durch den notwendigen Transport-, Installations-, Wartungs- und Entsorgungsaufwand zu erwarten, der zusätzliche THG-Emissionen verursacht. Konflikte mit anderen Nutzungen der Meere sind ebenfalls zu erwarten. Weiterhin gibt es Bedenken hinsichtlich ethischer Aspekte und sicherheitspolitischer Bedenken (Bennett et al. 2022) und erste Proteste der betroffenen indigenen Bevölkerung, z. B. gegen das Arctic Ice Project (<https://www.arcticiceproject.org>). Die Forschung zum Einsatz reflektierender Partikel zur Erhöhung der Oberflächenalbedo der Ozeane steht noch ganz am Anfang und es bestehen noch unzählige Unsicherheiten in Bezug auf die Art der Materialien, ihre Umweltauswirkungen an verschiedenen Orten und in verschiedenen Maßstäben, ihre Wirksamkeit als Klimaschutztechniken und die wirtschaftliche und soziale Durchführbarkeit solcher Aktivitäten in großem Maßstab.

Diese Geoengineering-Ansätze zielen teilweise nicht darauf ab, die globale Durchschnittstemperatur zu senken, sondern sollen die Fließgeschwindigkeit von Gletschern oder die Schmelzrate von Schelf- und Meereis verlangsamen, um so Eisflächen in Grönland, Arktis und Antarktis zu erhalten. Dadurch soll primär das Steigen des Meeresspiegels verlangsamt werden (Minunno et al., 2023; Lockley et al., 2020). Da das Schmelzen des Eises nur verhindert, aber keine neue weiße Fläche mit zusätzlichem Kühlungseffekt erzeugt werden würde, werden diese Ansätze teilweise von SRM abgegrenzt. In Studien werden sie auch als eigene Geoengineering-Kategorie namens „**Ice Management**“ oder „**Arctic Intervention**“ behandelt. Doch auch wenn sie speziell für beispielsweise Grönland gedacht sind, haben die großflächigen Ansätze ähnliche Auswirkungen auf das Klima wie ein globaler SRM-Einsatz, greifen in den Wasserkreislauf ein und verbrauchen enorme Mengen an Ressourcen (Argüello et al., 2023; Bodansky et al., 2020).

Exkurs: Albedomanagement und Klimaanpassung

Nicht jede Maßnahme zur Erhöhung der Oberflächenalbedo muss zwangsläufig eine Geoengineering-Maßnahme sein. Laut Definition sind Geoengineering-Maßnahmen großskalige und tiefgreifende Eingriffe in das Klimasystem. Das müssen sie auch sein, da sie dazu gedacht sind das Klima global zu beeinflussen. Die SRM-Ansätze zur Erhöhung der Oberflächenalbedo wirken zunächst lokal begrenzt und müssten daher auf großer Fläche und systematisch eingesetzt werden. Dann würden sie aber auch einen erheblichen Einfluss auf das Klima haben und könnten ein völlig neues Klima erzeugen.

Anpassung hingegen zielt darauf ab, die Resilienz von Systemen gegenüber den Auswirkungen des Klimawandels zu erhöhen, nicht das Klima selbst grundsätzlich zu ändern. Einige Anpassungs-Maßnahmen nutzen allerdings auch die Wirkung weißer Farbe. Jedoch nur um eine lokale, kühlende Wirkung zu erzielen. Die Abgrenzung zwischen SRM und Anpassung ist wichtig, da Anpassung neben THG-Minderung die zweite wichtige Säule des Klimaschutzes ist.

Soweit Maßnahmen einen tiefgreifenden Eingriff in das Klimasystem bewirken wollen, gehören sie nicht zu den Maßnahmen zur Anpassung an den Klimawandel. Soweit die Maßnahmen absehbar nur lokal eingesetzt werden sollen und können, handelt es sich um eine Anpassungsmaßnahme (zur rechtlichen und politischen Abgrenzung siehe auch Kap. 9.1)

7

SRM-Forschung

7.1 Unsicherheiten von SRM-Modellen

Modelle sind generell ein wichtiges Werkzeug der Klimawissenschaft, da sie Versuche in einem komplexen globalen System erlauben, ohne tatsächlich in die Umwelt einzugreifen. So können die Einflüsse verschiedener Parameter miteinander verglichen und Projektionen für zukünftige Entwicklungen getroffen werden. Es können dabei verschiedene Modelle als Grundlage verwendet werden, je nachdem welche Region und Fragestellung man abdecken möchte. Es gibt Erdsystemmodelle, die wiederum einzelne Modelle für Ozeane und Atmosphäre beinhalten, ökonomische Szenarien und Zusammenführungen aus beiden (DFG; 2014). Je detaillierter die Auflösung sein soll, desto mehr Rechenkapazität wird benötigt. Klimamodelle werden seit Jahrzehnten zur Beschreibung und Projektionen des sich vollziehenden Klimawandels entwickelt und fortlaufend verbessert. Dennoch bestehen erhebliche Unsicherheiten, weil grundlegende Prozesse und Elemente des Klimasystems noch gar nicht vollends verstanden sind, wie etwa die Dynamik von Wolken oder die Dynamik von Aerosolen (Gottmann et al., 2016). Auch wenn sie das am besten geeignete Instrument sind, das wir haben, um den Klimawandel vorherzusagen, ist zu berücksichtigen, dass Modellierungen stets nur eine Annäherung an die Realität sind, diese aber nicht vollständig erfassen können (Alizadeh, 2022; DFG; 2014). Dies wird insbesondere dann relevant, wenn daraus politische Entscheidungen mit schwerwiegenden Folgen, wie ein SRM-Einsatz, abgeleitet werden sollen.

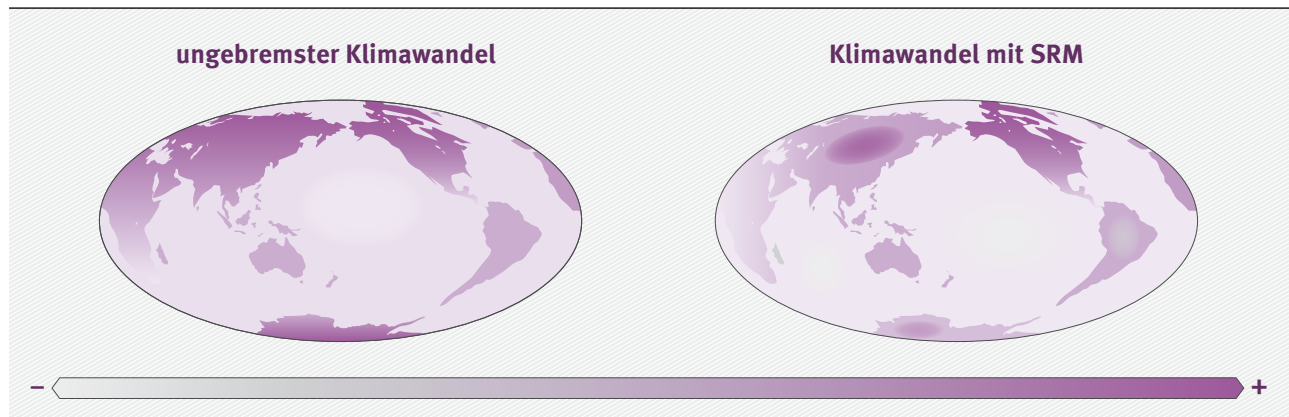
Auf Basis der Klimamodelle wurden Geoengineering-Modelle entwickelt. Damit soll vorhergesagt werden, ob unterschiedliche SRM-Durchführungen eine kühlende Wirkung erzielen könnten und wie sich diese auf Niederschlagsmuster, Meeresspiegel, Temperaturverteilung und Dürren auswirken. Auf der Basis der in ihrem tatsächlichen Ausmaß mehr oder weniger unbekannter Wechselwirkungen den zusätzlichen Einfluss von SRM zu ermitteln ist eine große Herausforderung der Modellierung (Caldeira et al., 2017). Schon kleine Abweichungen in den Annahmen, Parametrisierungen und Vereinfachungen können die unterschiedlichsten Ergebnisse und Fehlerspannweiten hervorbringen, sodass je nachdem entweder die

Potenziale oder die Gefahren von SRM überwiegen (ART GS EU Council, 2023; IPCC, 2022). Dabei fließen nicht nur Parameter des Klimasystems, sondern auch sozialpolitische und ökonomische Annahmen mit ein, die die Plausibilität der Ergebnisse mitbestimmen (IPCC, 2022). Ein SRM-Einsatz müsste ein oder mehrere Jahrhunderte dauern, sodass Aussagen über dessen Folgen auch in so großen Zeiträumen verlässlich projiziert werden müssten (Baur et al., 2023b). Die Unsicherheit von Szenarien wächst jedoch mit der Zeit exponentiell und ist bereits nach wenigen Jahrzehnten ein entscheidender Faktor (Alizadeh, 2022). Auch der angenommene Zeitpunkt des Einsatzes, vor allem in Kombination mit den Annahmen zum Verlauf des Klimawandels, kann die Ergebnisse maßgeblich beeinflussen und die projizierte Wirksamkeit von SRM einschränken oder die Wirkung umkehren (Wieners et al., 2023; Ricke et al., 2023).

Um die Ergebnisse verschiedener Studien besser miteinander vergleichen zu können und verlässlichere Aussagen zu treffen, wird seit 2010 vor allem auf vereinheitlichte Modelle des koordinierenden Projektes Geoengineering Model Intercomparison Project (GeoMIP) in Anlehnung an das Coupled Model Intercomparison Projekt (CMIP), das die zentralen Szenarien für die IPCC-Berichte liefert, zurückgegriffen. Innerhalb von GeoMIP gibt es Standards für die Modellierung von SRM-Interventionen namens bspw. „G6solar“ oder „G6sulfur“ (Visoni et al., 2023; Kravitz et al., 2011). Grundsätzlich vereinfachen diese Modelle den SRM-Einsatz sehr. Bei „G6solar“ bspw. wird nur der Parameter der einfallenden Sonnenstrahlung reduziert. Und auch bei den anderen Modellen wird eine Injektion von Aerosolen vereinfacht und zentral an einem oder wenigen Punkten, bspw. am Äquator, angenommen. Die Modelle basieren auf den CMIP6-Szenarien SSP5_8.5, das einen ungebremsten Klimawandel mit sehr hohen Emissionen projiziert, und SSP2_4.5, das moderate Klimaschutzpolitik annimmt. Der SRM-Einsatz wird oftmals rechnerisch so angepasst, dass er ausreicht, um die Erderwärmung von SSP5_8.5 auf das Niveau von SSP2_4.5 zu senken (Lozán et al., 2023; Yuo et al., 2023). Anschließend werden die zukünftigen Auswirkungen des idealisierten SRM-Einsatzes mit denen eines ungebremsten

Abbildung 6

Schema Risk vs. Risk Modellierung



Quelle: <https://acp.copernicus.org/articles/23/15305/2023/>

Klimawandels verglichen. Allerdings ist der aktuelle Stand der Wissenschaft, dass das Szenario SSP5_8.5 mittlerweile ein unwahrscheinlicher worst-case ist, weil dazu bereits initiiertes Klimaschutz wieder rückgängig gemacht werden müsste (Fotso-Nguemo et al., 2024; Hausfather et al., 2020). Demensprechend basieren nahezu alle bisherigen SRM-Studien auf zweifelhaften Grundannahmen. Die Ergebnisse der Gegenüberstellung der Risiken von SRM und Klimawandel hängen maßgeblich davon ab, welches Vergleichsszenario gewählt wird, sodass die Auswertung stets im Bewusstsein der Unsicherheiten erfolgen sollte (Fasullo et al., 2023; Visionsi et al., 2021). Mit der Überarbeitung der Szenarien im 7. Berichtszyklus des IPCC bis circa 2028 sollen auch die Annahmen hinter den Geoengineering-Modellen aktualisiert und verstärkt auf SSP2_4.5 zurückgegriffen werden. Für den Fast Track des CMIP7-Prozesses wurde eine SRM-Simulation ausgewählt, die eine SO₂-Injektion annimmt (Visionsi et al., 2024). Man ist sich zwar sicher, dass SO₂ aufgrund der negativen Begleiterscheinungen eigentlich ungeeignet ist (Kap. 6.2), jedoch sind die Modellierungen weder zu Calcit noch zu Diamantstaub als Aerosol fortgeschritten genug.

Die Ergebnisse der Modellierung werden oft als Weltkarten dargestellt. Da es nicht für alle Regionen Beobachtungsdaten gibt (Abbildung 6), müssen die vorhandenen Informationen auf die gesamte Welt interpoliert werden. Insbesondere im Globalen Süden gibt es weniger Daten, während sie sich in Industriestaaten bündeln. Im Sinne der Transparenz sollten die Regionen auf der Weltkarte, bei denen zur Berechnung der Werte eigentlich nicht genug Daten vorlagen,

gekennzeichnet werden. Gerade die regionalen Besonderheiten sind für die Risikoabwägung von enormer Bedeutung und gehen bei der Gegenüberstellung zweier Weltkarten leicht unter (Meyer et al., 2022; Ludwig et al., 2022). So haben auch kurzzeitige, lokale Wetterschwünge einen langfristigen Einfluss auf Gesellschaft und Ökosysteme, werden jedoch in der großen zeitlichen und räumlichen Auflösung der Modelle nicht abgebildet.

Nichtsdestotrotz ist es wichtig, die Auswirkungen eines SRM-Einsatzes nur in einer „simulierten Welt“ nachzuziehen, da ein Einsatz in der realen Welt mit schwerwiegenden Risiken einhergeht (Kap. 4 und 8) (DFG; 2014). Doch obwohl Simulationen und Modelle unverzichtbare Erkenntnisse über den Klimawandel und die Grundlagen des komplexen Klimasystems generieren und durch die Vergleiche verschiedener Simulationen untereinander immer aussagekräftigere Ergebnisse erzielt werden, sollte man verallgemeinernde Aussagen, welche simulierte Auswirkungen auf die realen Auswirkungen von SRM übertragen, mit Vorsicht betrachten (Caldeira et al., 2017). Zu SRM gibt es keine Erfahrungswerte aus der realen Welt, mit denen man die Ergebnisse gut validieren könnte. Dabei sind im Allgemeinen Daten aus tatsächlichen Beobachtungen wichtige Bausteine solcher Klimasystem-Simulationen (ART GS EU Council, 2023; Caldeira et al., 2017).

7.2 Labor- und Feldexperimente

Nach Ansicht einiger Autoren müssten die Modellierungen im nächsten Schritt durch Feldexperimente, die direkt im Ozean, in der Atmosphäre oder im Welt- raum stattfinden, unterstützt werden. Diese sollen so klein sein, dass sie noch keine Umweltauswirkungen haben, aber dennoch helfen, gewisse Aspekte besser zu beleuchten (UNEP, 2023; ART GS EU Council, 2023). Das exakte Verhalten der Aerosole in der Stratosphäre beispielsweise kann durch Computersimulationen oder Analogien zu Vulkanausbrüchen allein nicht genau genug vorhergesagt werden (Jin- nah et al., 2023; Caldeira et al., 2017). Daher wurden beispielweise die mit den Namen SPICE und SCoPEX abgekürzten Projekte aus UK und USA, bei denen jeweils ein Testballon aufsteigen sollte, geplant. Diese Freilandversuche zu SAI sind jedoch am Protest durch Anwohner*innen und NGOs gescheitert (Jin- nah et al., 2024; Baker et al., 2024). Die Sulfatfrei- setzungen mittels Ballon durch ein Privatunterneh- men aus den USA über mexikanischem Territorium sorgten ebenfalls für Konflikte (SEMARNAT Mexi- ko, 2023). Durchgeführt wurden Feldexperimente zur Erhöhung der Oberflächenalbedo (Kap. 6.5) und MCB (Kap. 6.4).

Kleinstexperimente im Freien können zwar zur Über- prüfung einzelner atmosphärenphysikalischer Wech- selwirkungen beitragen. Hervorzuheben ist aber, dass **kleinskalige Experimente nicht dazu geeig- net sind, ausreichende Erkenntnisse über die Risiken eines tatsächlichen SRM-Einsatzes zu liefern**. Um die bereits bekannten Risiken auf regi- onaler oder globaler Ebene eingehender zu unter- suchen und hinreichend verlässlich beurteilen zu können, wären eigentlich Freilandaktivitäten in grö- ßerem Maßstab, also in regionalem oder globalem Maßstab notwendig (Parson et al., 2013). Aussage- kräftige Experimente müssten also „Globale Experi- mente“ sein und würden sich nicht mehr von einem Einsatz unterscheiden. Die gleichen Risiken für die Umwelt und die betroffenen Bevölkerungsgruppen, die möglicherweise bereits irreversibel sind, würden bestehen. (DFG; 2014).

Ein Problem bei Freilandexperimenten wäre es, die Folgen und mögliche Schäden bspw. durch Überflu- tungen und Dürren, klar dem Experiment zuzuord- nen und auszuschließen, dass diese nicht durch an- dere Dynamiken unseres komplexen Klimasystems verursacht wurden (Terry et al., 2024; DFG; 2014). Das sorgt nicht nur für Schwierigkeiten bei der In- terpretation der Ergebnisse, sondern kann auch die praktische Durchführbarkeit von SRM-Freilandakti- vitäten zum Zwecke der Forschung in Frage stellen. Einerseits wären Schadensersatzansprüche kaum durchsetzbar, andererseits könnten bereits bloße Ver- mutungen zu Protesten einzelner Bevölkerungsgrup- pen führen.¹

Neben Freilandexperimenten werden auch **Labor- experimente** durchgeführt. Dabei können chemi- sche Eigenschaften von Aerosolen, Schaum und sons- tigen Materialien getestet oder Nebelkammern (engl: cloud chamber) zur künstlichen Wolkenbildung be- nutzt werden (Steinke et al., 2024). Im Gegensatz zu Freilandexperimenten gehen von Laborexperimenten eher keine unmittelbaren Umweltauswirkungen aus.

Grundsätzlich gilt, dass wissenschaftliche Expe- rimente der Mehrung des Wissens zu Wirkweise und Risiken von SRM dienen sollen. Davon **abzu- grenzen ist die Entwicklung von technischer Infrastruktur**, bei der beispielsweise Sprühköpfe und Ballone, sowie Weltrauminstallationen inge- nieurtechnisch entworfen, gebaut und schließlich getestet werden (Tollefson, 2021).



1 Siehe die Proteste ungarischer Bauern in Zusammenhang mit Hagelfliegern: <https://haszon.hu/haszonagrar/innovacio/jegkar-halalos-fenyegeset>.

7.3 Führt Forschung zur Anwendung?

Eine lebhaft debattierte Frage spinnt sich um die Frage, ob mehr Forschung und insbesondere Freilandexperimente dazu beitragen, dass SRM letztendlich zur Anwendung kommt. Bildlich gesprochen steht man auf einem rutschigen Abhang und gleitet von der Forschung allmählich in den Einsatz über (engl.: **slippery slope argument**) (Callies, 2019). Die Schlussfolgerung daraus ist, Forschung zu bestimmten Methoden oder Größenordnungen einzuschränken, da sie dazu führen kann, dass ein Einsatz ab einem Zeitpunkt theoretisch vorbereitet wäre und dies dann auch zum tatsächlichen Einsatz führt (Andow, 2023; Quaas et al., 2017). Neben der technischen Machbarkeit trägt auch die politische Akzeptanz von kleinskaligen SRM-Experimenten dazu bei, dass die Hürden für einen größeren Einsatz von SRM kleiner werden (Lockyer et al., 2019). Dazu kommt, dass die Wissenschaftsgemeinschaft selbst oder die zu diesem Zweck gegründeten Institutionen als Lobby für weitere Forschung fungieren (Lin, 2016; Jamieson, 1996). Zum anderen wollen Projektinhabende, dass sich die hohen Investitionskosten lohnen (Gardiner et al., 2010). Wenn bei den ersten Versuchen festgestellt würde, dass die Risiken zu hoch sind, muss daher nicht zwangsläufig der Abbruch aller Bemühungen verkündet werden, sondern es könnten auch die Bedingungen heruntergeschraubt werden, damit die Experimente nicht aufgegeben werden müssen (Neuber et al., 2020). Zudem sind Fördergelder und die Infrastruktur für andere Nicht-SRM-Projekte blockiert und da diese dadurch weniger Erkenntnisse und Fortschritte erzielen können, ist es für die bereits laufenden SRM-Experimente wiederum leichter, weitere Förderung zu erhalten. Darüber hinaus gewöhnt sich der Mensch recht schnell an neue Situationen, sodass zukünftige Generationen SRM-Experimente gar mehr hinterfragen könnten. All diese Punkte ergeben eine positive Rückkopplung (McKinnon, 2019). Zwar wird auch hinterfragt, ob eine geeignete Regelung diesen Effekt nicht abmildern könnte (Callies, 2019), jedoch ist das Risiko, dass ein Forschungsprojekt eine Eigendynamik hin zum Einsatz entwickeln kann, im Anbetracht einer vorsorgeorientierten Politik nicht einfach zur Seite zu wischen und gilt vor diesem Hintergrund

vielmehr als valides Gegenargument (Andow, 2023). Die Forschung zu SRM weist darüber hinaus große Schnittmengen zur allgemeinen Klima- und Atmosphärenforschung auf, wenn auch mit anderen Gewichtungen. Daher ist es sinnvoller, Mühen und Ressourcen in das Verständnis des Klimasystems zu investieren, da es zukünftigen Generationen in jedem Fall weiterhilft, anstatt in kostspielige SRM-Experimente, deren Auswirkungen unvorhersehbar und potenziell gefährlich sind (Gardiner et al., 2010).

Auch könnten umfangreiche öffentlich finanzierte Forschungsprojekte wiederum Auswirkungen auf Märkte und politische Prozesse haben. Durch die mit umfangreichen Forschungsprojekten einhergehende Normalisierung von SRM können internationale Investoren und venture capital-Finanzinstrumente die zukünftigen Vermarktungschancen für SRM-Ansätze positiver bewerten und Interessenspositionen für den Einsatz von SRM können sich verstärken (Surprise et al., 2022). SRM könnte sich als zukünftiges chancenreiches Geschäftsmodell verfestigen (vgl. die kritische Darstellung zum Versuch der Kommerzialisierung von SRM in (CSSN 2021)). Es steht daher die Forderung im Raum, dass SRM-Forschung gar nicht durch öffentliche Gelder finanziert werden sollte (Biermann et al., 2022).

Risiken von Solar Radiation Modification (SRM)

SRM soll die globale Erwärmung durch die Erhöhung der Albedo der Erde maskieren, zum Beispiel durch das Einbringen von Aerosolen in die Stratosphäre. Dies würde das gesamte Klimasystem verändern und damit weitreichende Auswirkungen auf alle Lebensbereiche haben.

Geopolitische Spannungen

Durch erschwerte politische Konsensfindung zu SRM bis hin zur Gefahr eines unilateralen Einsatzes drohen internationale Konflikte.

Schwächung des Klimaschutzes

Das Vertrauen auf SRM als vermeintliche Lösung für den Klimawandel könnte die Bemühungen zur Reduzierung von Treibhausgasen, inkl. des Ausstiegs aus fossilen Brennstoffen, schwächen und den Umstieg auf erneuerbare Energien behindern.

Gestörte Ökosysteme

Veränderte klimatische Bedingungen können Lebensräume und Nahrungsnetze schädigen und zum Verlust der biologischen Vielfalt beitragen.

Verstärkte Ungleichheit

Eine ungerechte Verteilung negativer Auswirkungen könnte die Ungleichheit zwischen und innerhalb von Nationen verschärfen, während das Risiko eines Abbruchschocks und technologischer Abhängigkeit zukünftige Generationen belasten könnten.

Gefährdete Meeresökosysteme

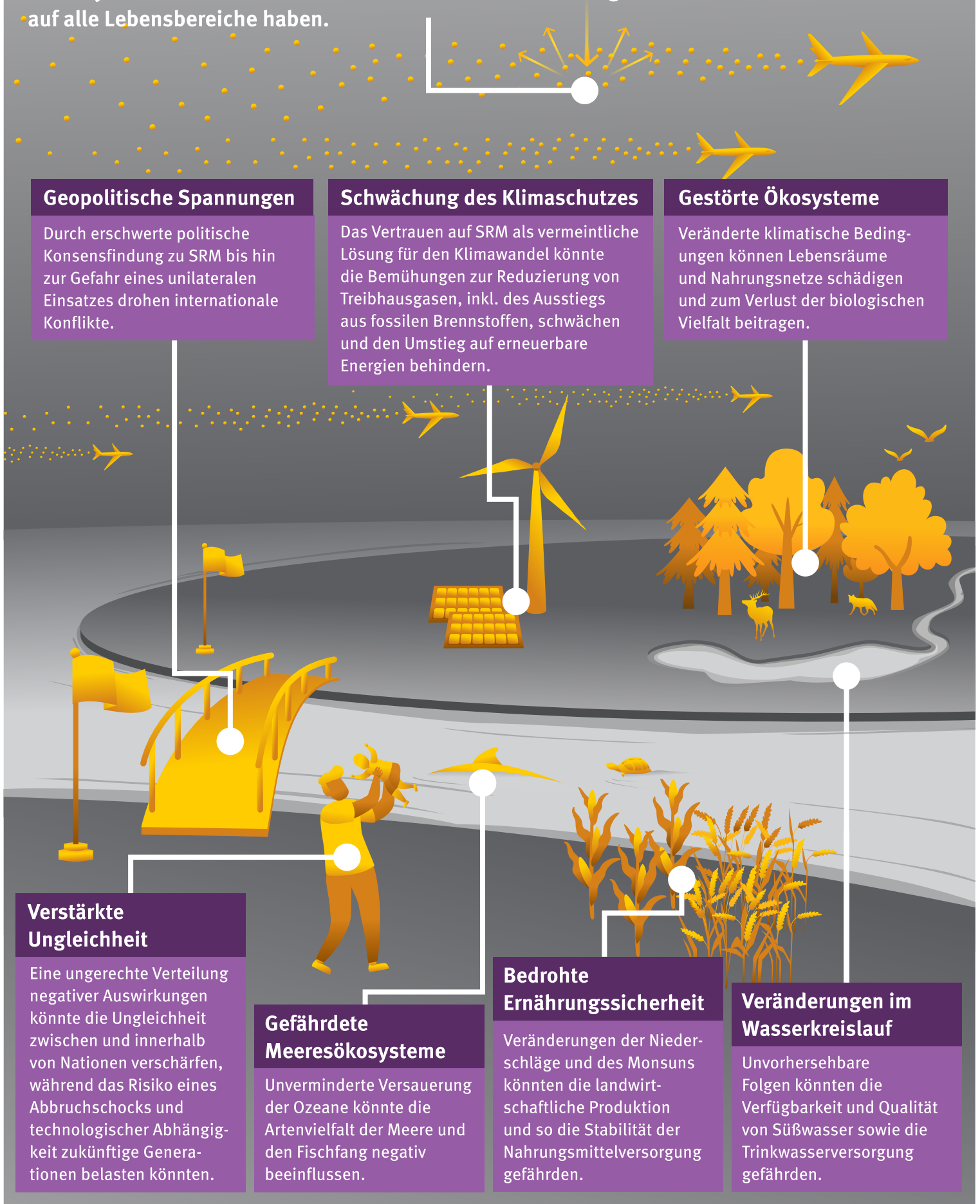
Unverminderte Versauerung der Ozeane könnte die Artenvielfalt der Meere und den Fischfang negativ beeinflussen.

Bedrohte Ernährungssicherheit

Veränderungen der Niederschläge und des Monsuns könnten die landwirtschaftliche Produktion und so die Stabilität der Nahrungsmittelversorgung gefährden.

Veränderungen im Wasserkreislauf

Unvorhersehbare Folgen könnten die Verfügbarkeit und Qualität von Süßwasser sowie die Trinkwasserversorgung gefährden.





SRM birgt viele Risiken

Auf Basis der Modellierungen und auf Grund der Wirkweise von SRM (Kap. 4) stehen einige Risiken von SRM bereits fest, auch wenn erhebliche Unsicherheiten bestehend bleiben. Trotz Forschung können nicht alle negativen Auswirkungen ausgeschlossen werden. Bei einem globalen Einsatz von SRM kämen noch unerwartete Konsequenzen zum Vorschein (engl.: unknown unknowns) (Young, 2023; Davies, 2011).

8.1 Risiken für Wasserverfügbarkeit und Ernährungssicherheit

Mit Modellen (Kap. 7.1) wird versucht vorherzusagen, welchen Einfluss SRM auf Niederschlagsverteilung und auch auf die Photosynthese von Pflanzen und damit auf **(Trink-) Wasserverfügbarkeit und Ernteerträge, sprich die Ernährungssicherheit** (Davies, 2011) hat. Nähme man an, SRM könne den Klimawandel problemlos rückgängig machen, könnte man schlussfolgern, dass alle negativen Auswirkungen des Klimawandels dadurch abgewendet werden könnten. Doch anders als an einzelnen Stellen behauptet, wird SRM die negativen Folgen des Klimawandels auf die Ernährungssicherheit nicht einfach verhindern können (Proctor et al., 2018). Auch wenn sich positive Auswirkungen von SRM auf die Wasserverfügbarkeit bestimmter Regionen im Vergleich zu einem ungebremsten Klimawandel modellieren lassen, sind die Ergebnisse unsicher und berücksichtigen nicht die Auswirkungen veränderter Niederschläge oder lokale Effekte (Fotso-Nguemo et al., 2024). Neben Dürren und Überschwemmungen auf landwirtschaftlichen Flächen ist die Veränderung der Photosynthese-Leistung von Acker- und Forstpflanzen eine Bedrohung für die Lebensgrundlage der darauf angewiesenen Menschen (Xia et al., 2014; Robock, 2008). Die reine Abnahme der Temperatur würde unbestreitbar dem Hitzestress entgegenwirken und könnte somit die Ernteerträge steigern, jedoch würde es immer auch zu einzelnen Ernteausfällen kommen (Pongratz et al., 2012). Diese lokalen Auswirkungen sind in globalen Computermodellen nicht detailliert abgebildet. Im globalen Maßstab und unter Akzeptanz bekannter Unsicherheiten lässt sich die Aussage treffen, SRM würde allgemein zu einer Steigerung der Ernteerträge führen (Fan et al., 2021). Dies unterscheidet sich jedoch für einzelne Ackerpflanzen

und wird unter der Annahme gleichbleibender Kultivierung getroffen (Xia et al., 2014). Bei anderen Feldfrüchten wird sogar ein massiver Rückgang berechnet. Insgesamt besteht noch erhebliche Ungewissheit, sodass eine finale Aussage gar nicht getroffen werden kann (Yang et al., 2016). Zudem kann für manche Gemeinschaften, insbesondere aus der indigenen Bevölkerung oder aus Entwicklungsländern, bereits ein lokaler, kurzzeitiger Ernteausfall einzelner Sorten lebensbedrohlich enden. Auch die Ernährungssicherheit von Bevölkerungsgruppen, die vom Fischfang leben, ist bei den Studien nicht berücksichtigt. Dabei wären diese durch die Versauerung des Ozeans massiv bedroht (Kortetmäki et al., 2023). Darüber hinaus ist in den Studien vor allem die andauernde düngende Wirkung von CO₂ der wachstumssteigernde Faktor (Xia et al., 2014; Pongratz et al., 2012). Dies widerspricht jedoch der Argumentation, dass die CO₂-Konzentration während eines SRM-Einsatzes ohnehin reduziert werden müssten (Kap. 5).

8.2 Risiken für internationale, politische Konflikte

Die zuvor beschriebenen Auswirkungen auf das weltweite Klima (Kap. 4) können gewaltsame, grenzüberschreitende sowie innerstaatliche Konflikte wahrscheinlicher machen (Global Risk Report, 2024; Sovacool et al., 2023). Die durch SRM erzeugten Änderungen könnten für einen Region günstig sein, während ein anderer Staat seine Lebensgrundlage, beispielweise durch veränderten Monsun, bedroht sieht (ART GS EU Council, 2023; Michaelowa, 2021; Schellnhuber 2011). Die unvorhersehbare Änderung des Klimas durch SRM würde Gewinner- und Verliererstaaten erzeugen (ART GS EU Council, 2023; Global Risk Report, 2022). Darunter würden vor allem diejenigen Bevölkerungsgruppen leiden, die auch am meisten vom Klimawandel betroffen wären, da sie sich nicht so schnell an die veränderten Bedingungen anpassen könnten (Rickels et al., 2020; Schäfer et al., 2015). Da die Kapazitäten für einen möglich Einsatz eher in Industriestaaten liegen, kommen möglicherweise neokolonialistische Strukturen zum Vorschein (Sovacool, 2021; Bellamy et al., 2018) und das Machtgefälle zwischen Industriestaaten und Entwicklungsländern würde durch SRM verstärkt werden.

SRM als Notfall-Lösung könnte zur Militarisierung und Versicherheitlichung (securitization)² missbraucht werden (Neuber et al., 2020). Auch wenn ein gezielter Angriff auf Grund mangelnder Präzision der regionalen Auswirkungen von SRM zu riskant sein mag, so könnte es zumindest als militärische Bedrohung wahrgenommen oder genutzt werden (ART GS EU Council, 2023). Und auch die Beendigung eines SRM-Einsatzes durch militärische Eingriffe und damit das Auslösen des Abbruch-Schocks kann als Drohung verwendet werden (Lockyer et al., 2019). Insbesondere da Populisten und autoritäre Regierungen weltweit zunehmen, ist die militärische Zweckentfremdung von SRM nicht auszuschließen (Global Risk Report, 2023).

Und auch über eine bewusste kriegerische Nutzung von SRM hinaus besteht ein erhebliches Risiko für die internationalen Politikprozesse. Nicht wenige Staaten haben die Tendenz, den Klimawandel nicht ernst zu nehmen und nicht ausreichend in nachhaltige THG-Minderung zu investieren. Durch zunehmende Extremwetterereignisse könnte der Druck auf solche Regierungen jedoch steigen, doch noch Klimaschutz zu betreiben. Dabei könnten sie, anstelle echter Klimaschutzmaßnahmen, auf SRM zurückgreifen, um dies als eine vermeintlich günstige und schnelle Möglichkeit öffentlichkeitswirksam als „Lösung“ zu präsentieren. Die grenzüberschreitenden und langfristigen Risiken stellen für nationalistische und populistische Regierungen dabei keinen Hinderungsgrund dar. Im Gegenteil zeigt sich eher eine ablehnende Haltung gegenüber multilateralen Organisationen wie der EU oder der UN. Durch diese Zusammenhänge und weil eine Einigung der Weltgemeinschaft auf einen konsensualen SRM-Einsatz und dessen erforderliche Intensität, Dauer und Ort, unrealistisch erscheint (Muraca et al., 2018), ist ein Einsatz durch einzelne Staaten wahrscheinlicher als eine gemeinschaftlich koordinierte Durchführung von SRM (Michaelowa, 2021; Young, 2023).

Es stellt sich die Frage, wie Staaten reagieren könnten, die mit einem SRM-Einsatz nicht einverstanden wären. Möglich wären Gegenmaßnahmen, die das Klima in die entgegengesetzte Richtung beeinflussen sollen (**Counter-SRM**), wie der gezielten Freisetzung von THG oder Kohlenstoff (Heyen et al., 2019; Horton

et al., 2011; Millard-Ball, 2012). Dass eine Regierung den Klimawandel wieder absichtlich vorantreiben könnte, erscheint unwahrscheinlich, weswegen wirtschaftliche Sanktionen, wie sie auch heutzutage verhängt werden, naheliegender sind. Da diese jedoch nicht immer wirken, könnte die Gegenmaßnahme darin bestehen, den SRM-Einsatz durch militärische Angriffe zu stoppen – sei es durch Cyberangriffe oder die Zerstörung der Infrastruktur (Lockyer et al., 2019). Gerade bei Weltrauminstallationen wären dazu nur wenige Staaten in der Lage.

8.3 Risiken für Treibhausgasminde rung und Klimaanpassung

Die Umdeutung der gesamtgesellschaftlichen Aufgabe von Treibhausgasminde rung und Klimaanpassung in ein scheinbar rein technisches Problem verschleiert die Notwendigkeit von Verhaltensänderungen und einer sozial-ökologischen Transformation. Die Erforschung und der Einsatz von SRM müssten so gestaltet sein, dass sie nicht in Abhängigkeiten von bisherigen Strukturen führen (engl.: lock-in effect). Bedenkt man jedoch, dass die für SRM benötigten Ressourcen eng mit der fossilen Industrie verknüpft sind, erscheint diese Bedingung als nicht gegeben (Neuber et al., 2020; Muraca et al., 2018; Owen, 2014). Auch über die direkten Zusammenhänge zwischen fossilen Brennstoffen für den Betrieb von SRM-Infrastruktur hinaus sind SRM und fossile Industrie miteinander gekoppelt. Zahlreiche Publikationen diskutieren das sogenannte moralische Wagnis (engl.: moral hazard). Zwar kann niemand endgültig vorhersagen, ob ein Vertrauen auf SRM als Techno-Fix in der Zukunft tatsächlich dazu führen wird, dass die THG-Minderung weniger Beachtung findet und der Ausstieg aus fossilen Brennstoffen verzögert wird. Es liegt jedoch nahe, dass bereits die Beschäftigung und Erforschung von SRM politisches Engagement, mediale Aufmerksamkeit und begrenzte finanzielle Mittel bindet, die andernfalls in Klimaschutzmaßnahmen hätten investiert werden können. Als Gegenargument heißt es, die Angst vor der Bedrohung eines SRM-Einsatzes könnte andere Staaten sogar erst dazu bewegen, lieber ihre THG-Emissionen drastisch zu senken als sich auf SRM einzulassen (ART GS EU Council, 2023; Neuber et al., 2020; Schäfer et al., 2015; Hamilton, 2013; Preston, 2013; Gardiner et al., 2010).

2 Prozess, bei dem ein Thema als sicherheitsrelevant dargestellt wird, um besondere politische Maßnahmen zu rechtfertigen.

Die Abkehr von fossilen Brennstoffen könnte erschwert werden, wenn das Potenzial der alternativen, **erneuerbaren Energiequellen** durch SRM negativ beeinflusst würde. Die Leistung von Photovoltaikanlagen könnte verringert werden, denn diese laufen am effizientesten mit bestimmten Bestandteilen direkter Sonnenstrahlung. Ausgerechnet diese würde jedoch durch einen SRM-Ansatz reduziert (Smith et al., 2017; Robock, 2008). Erste Erkenntnisse deuten darauf hin, dass der Einfluss auf Windkraft global und langfristig gesehen wenig ins Gewicht fällt, aber lokal große Schwankungen aufweist (Baur et al., 2024). Erneuerbare Energien könnten durch SRM also weniger kostengünstig und wettbewerbsfähig gegenüber fossilen Brennstoffen werden, was die THG-Minderung verzögern und die Dauer eines SRM-Einsatzes verlängern würde (Baur et al., 2023a). Insgesamt sind diese Ergebnisse jedoch als vorläufig zu betrachten und weisen große Unsicherheiten auf (Kumler et al., 2025).

Einzelne Unternehmen bieten Zertifikate über kleinskalige SRM-Einsätze zum Kauf an, die die CO₂-Emissionen von Unternehmen kompensieren sollen. Diese vermeintlichen „Kühlungszertifikate“ können jedoch nicht zur THG-Neutralität beitragen und haben eher **Greenwashing**-Qualität (Diamond et al., 2023).

SRM kann in keinem Fall eine umgehende und umfassende **Anpassung** an den Klimawandel ersetzen. Das Klima und die Ökosysteme reagieren komplex und in Teilen irreversibel auf den Anstieg der CO₂-Konzentration in der Atmosphäre, was nicht vollständig durch eine nachträgliche Maskierung der Erwärmung rückgängig gemacht werden kann. Klimaanpassung hingegen zielt auf die Resilienz gegenüber Klimawandelfolgen ab und ist deshalb unabdingbar. Indem die Erforschung und Entwicklung von SRM die Umsetzung von Anpassungsmaßnahmen verzögert, werden die Schäden durch den Klimawandel erhöht. Gleichzeitig kann SRM unsere Anpassungskapazität – die Möglichkeiten von Bevölkerung, Ökosystemen und Wirtschaft, sich an die Folgen des Klimawandels und veränderte Umweltbedingungen anzupassen (UBA, 2021) – durch die assoziierten Risiken für Wasserverfügbarkeit, Ernährungssicherheit und Ökosysteme (Kap. 8.5 und 8.6) verringern.

8.4 Risiken für zukünftige Generationen

Eine Verzögerung von THG-Minderung und Klimaanpassung hätte langfristige Folgen für zukünftige Generationen. Die moralische Frage nach der **Generationengerechtigkeit** ist ein wichtiger Aspekt. Denn die Ungleichheit zwischen Generationen kann dadurch zusätzlich verstärkt werden, dass SRM über mehrere Jahrhunderte und Generationen hinweg aufrechterhalten werden müsste. Man kann argumentieren, dass eine erfolgreiche Durchführung von SRM die Folgen des Klimawandels für zukünftige Generationen abmildern würde, allerdings verlagert man ebenso die negativen Langzeitauswirkungen, Risiken und Kosten eines SRM-Einsatzes in die Zukunft. Insbesondere der drohende plötzliche Temperaturanstieg durch das Beenden von SRM-Einsätzen kommt einer Erpressung gleich, bei der zukünftige Generationen dazu gezwungen sind, die Treibhausgaskonzentration in der Atmosphäre zu senken und den Umbau der Gesellschaft, dem heutige Generationen sich entzogen haben, um jeden Preis durchzusetzen (Davies, 2020). Auch darüber hinaus schränkte das heutige Verlassen auf eine unsichere Technologie den Handlungsspielraum und die Selbstbestimmung zukünftiger Generationen ein (Schäfer et al., 2015). Zusätzlich wird das Argument vorgebracht, man müsse zukünftigen Generationen SRM als ein Teil des Werkzeugkoffers gegen den Klimawandel zur Verfügung stellen (engl: arm the future argument). Dies ist insofern fragwürdig, als dass ausreichende Möglichkeiten zur Vermeidung der Klimakrise an sich existieren, die mit geringeren Risiken einhergehen (Gardiner, et al., 2010).

8.5 Risiko der einseitigen und intransparenten Finanzierung

Die Fördergelder für SRM-Forschung stammten zum Großteil von privaten Investoren und (philanthropischen) Stiftungen aus dem globalen Norden ([SGNUA, 2023](#)). Daneben gibt es auch staatlichen Forschungsprogramme. „Open Philanthropy“ ist neben „SilverLining“ und einzelnen Milliardären bisher der größte Geldgeber gewesen ([ART GS EU Council, 2023](#); [Surprise et al., 2023](#)). Nennenswert ist der Fond „Fund for Innovative Climate and Energy Research“ (FICER) von Bill Gates, aus dem unter anderem das Forschungsprogramm zu Solarem Geoengineering der Harvard Universität (Harvard’s SGRP) finanziert wird ([The Keith Group](#)), sowie die „Degrees Initiative“ (früher „SRM Governance Initiative“, SRMGI). Letztere unterstützt Forschende aus dem Globalen Süden durch finanzielle Mittel und fachliche Betreuung durch SRM-Expert*innen, größtenteils aus dem Globalen Norden ([DEGREES Initiative](#)). Es besteht die Möglichkeit, dass ganze Forschungskarrieren durch diese Geldströme bedingt sind und die Interessen des Globalen Südens vorgeschoben werden, um die Debatte um SRM weiter zu normalisieren ([Chalmin, 2024](#)).

Viele und ähnlichen Institutionen arbeiten häufig zusammen und stehen im Austausch mit politischen Entscheidungsträger*innen, wissenschaftlichen Vereinigungen und staatlichen Behörden ([Surprise et al., 2023](#)). In diesem Rahmen kommt die Sorge auf, dass private Akteure aus dem Globalen Norden die SRM-Technologien durch den Wissensvorsprung sowie finanzielle und technologische Kapazitäten und Patente regelrecht besitzen könnten, was das Machtgefälle zwischen Industriestaaten und Entwicklungsländern ebenfalls verstärkt ([UNEP, 2023](#); [Robock, 2008](#)).

8.6 Riskante Kostenberechnungen

In der Diskussion um SRM werden immer wieder die geringen Kosten als Vorteil genannt. Daraus abgeleitet wird die Möglichkeit eines **unilateralen Einsatzes** durch finanzstarke Einzelpersonen oder einzelne Staaten. Es ist allerdings fraglich, ob private Akteure über die logistischen und militärischen Kapazitäten verfügen, einen SRM-Einsatz, insbesondere gegen den internationalen Willen, aufrecht zu erhalten. Dazu wären wohl nur einige wenige Staaten tatsächlich in der Lage ([Parson et al., 2013](#)).

Ein anderes Risiko ist vielmehr die **Unterschätzung** der tatsächlichen Kosten. Die Kosten für SRM fallen nämlich höher aus als oftmals angenommen ([Aaheim et al., 2015](#)). Relativ, im Vergleich zu anderen Geoengineering-Ansätzen, mag gerade SAI zwar günstig sein, aber absolut gesehen übersteigen die Kosten das, was sich einzelne Staaten oder Personen leisten können. ([Smith, 2020](#)). Während die jährlichen Kosten vielleicht gering sein mögen, so darf man den langen Zeitraum, über den hinweg SRM angewendet werden müsste, nicht außer Acht lassen. Neben der Produktion der benötigten Maschinen und Infrastruktur, sind auch Kosten von Treibstoff, Personal, limitierten Ressourcen etc. zu berücksichtigen. Neben diesen direkten Betriebskosten fallen vor allem die unberechenbaren Kosten von Schäden an Umwelt, Biodiversität und Menschenleben oder politische **Entschädigungszahlungen** ins Gewicht, werden bei der Behauptung, SRM sei günstig, aber nicht ausreichend berücksichtigt ([Rickels et al., 2020](#); [Schäfer et al., 2015](#); [Klepper et al., 2012](#); [Davies, 2011](#)). Dabei stellt die Unsicherheit über soziale und wirtschaftliche Konsequenzen von Umweltveränderungen an sich einen Kostenfaktor dar ([Gramstad et al., 2010](#)). So können Summen erreicht werden, die auch der Bekämpfung des weltweiten Hungers, der Entwicklung von Medizin oder der Förderung von Bildung dienen könnten ([Davies, 2011](#)). Es gibt derzeit keinen Plan für die Kontrolle der Auswirkungen und Wirksamkeit von SRM, dabei wäre dies sehr teuer und aufwendig ([Michaelowa, 2021](#)). Auch wäre ein standardisiertes Monitoring Grundlage für etwaige Ansprüche auf Entschädigung. Es gibt jedoch auch kein System für Entschädigungszahlungen und ein solches aufzubauen erweist sich schon bei den Folgen des Klimawandels als schwierig. Zudem wäre es kaum möglich zu bestimmen ob ein Starkwetterereignis noch eine Folge des Klimawandels ist oder durch SRM ausgelöst wurde und, falls mehrere Staaten verschiedene

Methoden anwenden, durch welche und wann genau. Die einzige Möglichkeit eines Vergleiches bieten Computermodelle, jedoch ist fraglich, ob eine Simulationen als justiziable Grundlage anerkannt werden würde (Schäfer et al., 2015).

8.7 Risiken für Umwelt- und Meeresschutz

Auch wenn SRM konstant aufrechterhalten werden würde und es nicht zum Abbruchs-Schock (Kap. 4) käme, ergeben sich aus der Maskierung der Erderwärmung weitere Risiken. Da die Konzentration von CO₂ in der Atmosphäre gleichbleiben oder weiter steigen würde und damit auch mehr CO₂ im Ozeanwasser gelöst wird, würde die **Ozeanversauerung** fortbestehen und mitunter voranschreiten (Wagner, 2023; Robock, 2008). Insbesondere Korallenriffe leiden unter der Ozeanversauerung. Eine sinkende Meeresoberflächentemperatur vermag den Stressfaktor der Korallenbleiche zwar zu mindern, jedoch hat die Ozeanversauerung negative Folgen auf Reproduktion und Kalkbildung, die durch SRM nicht behoben werden würden. Im Gegenteil wird eine Überkühlung der tropischen Breiten durch SRM vorhergesagt, die die Auswirkung der Ozeanversauerung auf Korallen sogar verstärken könnte (Kwiatkowski et al., 2015; Couce et al., 2013). Durch SRM sind weitreichende Veränderungen in der Wassersäule, den Nahrungsnetzen und den biogeochemischen Kreisläufen in den Meeren zu erwarten, die auch die Fähigkeit des Ozeans zur Kohlenstoffbindung beeinträchtigen könnten (GESAMP 2019).

Die Umwelt- und Gesundheitsrisiken durch die eingesetzten Partikel und Materialien variieren je nach Ansatz, wobei auch innerhalb eines Ansatzes unterschiedliche Chemikalien genutzt werden könnten (Kap. 6). Maßnahmen in der Stratosphäre oder im Weltraum könnten die Ozonschicht stark beeinträchtigen. Die dafür verwendeten Chemikalien und Stoffe (wie z. B. NO₂), welche durch die Verbrennung von Treibstoffen bzw. beim Wiedereintritt in die Atmosphäre entstehen, wird der Ozonabbau vorangetrieben und das Schließen des Ozonlochs verzögert (Roy, 2022; UBA, 2016; Tilmes et al., 2009).

Durch den Einsatz von SRM könnte weiterer Verlust an Biodiversität eintreten (IPCC, 2018). Um die genauen Auswirkungen auf die Umwelt zu bestimmen, wäre ein detailliertes Wissen über Abläufe in den Ökosystemen und dem Klimasystem und den Wechselwirkungen zwischen Atmosphäre, Biosphäre und Hydrosphäre nötig, das jedoch nicht in ausreichendem Maße vorliegt (Matthews et al., 2009). Ähnlich zu anderen großflächigen Eingriffen sind auch die Umweltschäden, die durch die für SRM neu zu bauende Infrastruktur, den Antrieb, die Herstellung der Mittel sowie deren Transport entstehen, einzuordnen (Robock, 2008). Dadurch kann es zu Lebensraum- und Biodiversitätsverlust sowie Boden- und Gewässerverschmutzung kommen. Ein Einsatz von SRM als Reaktion auf die Klimakrise darf den Anstrengungen zur Bewältigung der **Biodiversitäts- und Verschmutzungskrise** nicht entgegenstehen.

9

Ein internationales Regime für die übergreifende Steuerung von SRM?

Die Debatten um SRM sind mitunter hitzig und polarisiert. Dabei darf nicht vergessen werden, dass SRM - im Sinne einer großskaligen Antwort auf die Klimakrise – bisher eine rein theoretische Option ist, und auch in absehbarer Zukunft ist ein vernünftiger Einsatz von SRM, dessen Folgen mit hinreichender Sicherheit abschätzbar wären, nicht in Sicht. Im Folgenden soll daher ein nüchterner Blick auf den bestehenden Rechtsrahmen und die Regulierungsoptionen

geworfen werden. In diesem Kapitel 9 soll zunächst auf den SRM-Begriff im internationalen Recht eingegangen werden, um danach diejenigen Regime und Verträge zu beleuchten, die SRM als solches regeln und somit als zentrales Forum künftiger Entscheidungsfindung dienen könnten. In Kapitel 10 wird sodann auf bestehende Regelungen eingegangen, die schon jetzt bestimmte Formen und Auswirkungen von SRM begrenzen können.

Die Debatte zur Regulierung und Steuerung von SRM – Ein kurzer Überblick

Die Veröffentlichungen und Vorschläge zur Regulierung und Steuerung von SRM sind in den letzten Jahren stark angestiegen. Teilweise werden die Akteure, politischen Prozesse und die Wirkungen wissenschaftlicher Sachstandsberichte der internationalen Institutionen beschrieben. Dabei wird festgestellt ([Gupta/Möller, 2019](#)), dass es bereits eine informelle „de facto governance“ gebe, die die Wahrnehmung der vorhandenen Optionen und die internationalen Politik-Prozesse zum Thema SRM prägt. Andere Studien beschäftigen sich mit der künftigen Regulierung von SRM. Dabei fokussieren einige auf eine „enabling governance“, also auf die Ermöglichung von SRM-Forschung und Anwendung (etwa [Buck et al. 2023](#); [Honegger et al., 2013](#)), andere untersuchen im Schwerpunkt die Begrenzung und Regulierung von SRM im Sinne einer „restrictive governance“ (etwa [Gupta et al., 2024](#)). Mehrere Studien untersuchen die Geeignetheit der bestehenden internationalen Institutionen und Verträge und kommen ganz überwiegend zu dem Ergebnis, dass kein Vertragsregime für sich genommen ohne Weiteres als zentrales Forum zur Steuerung von SRM geeignet wäre (etwa: [Bodle/Oberthür 2014](#); [Krüger 2020](#); [Reynolds 2019](#)). Ein großer Teil folgert hieraus, dass eine problematische Fragmentierung des internationalen Rechts und erhebliche Governance-Lücken bestehen ([Honegger et al. 2013](#), S. 134, [Reynolds et al. 2022](#)). Die Beurteilung dieser Frage wird maßgeblich durch die Ausgangsprämissen der jeweiligen Autor*innen geprägt. Wenn man davon ausgeht, dass eine international geregelte Ermöglichung von SRM-Aktivitäten vorangetrieben werden soll, werden die Lücken des internationalen Rechts regelmäßig als besonders gravierend beurteilt. Andere Autor*innen betonen, dass es unmöglich sein dürfte, die Anwendung von SRM und die Modalitäten einer globalen Durchführung multilateral zu vereinbaren und zu regulieren ([Corry 2017](#); [Hulme 2014](#)). In diesem Zusammenhang werden Forderungen zu einem Nicht-Nutzungs-Abkommen (Non-Use Agreement) ([Biermann et al., 2022](#); [Gupta et al., 2024](#)) formuliert.

9.1 Der SRM- und Geoengineering-Begriff im internationalen Recht

Wenige internationale Rechtstexte erwähnen Geoengineering oder SRM ausdrücklich. Eine völkerrechtliche Definition von SRM wurde unter der Biodiversitätskonvention (CBD) vorgenommen. In der Entscheidung CBD X/33 wird SRM als Unterform des Geoengineering folgendermaßen definiert: „*any technologies that deliberately reduce solar insolation*“.

Diese und die üblichen SRM-Definitionen helfen jedoch nicht ohne weiteres bei der Abgrenzung von SRM-Maßnahmen zur Klimaanpassung (s. Box Kap. 6.5) und zur Wetterbeeinflussung (s. Box Kap. 6.4). Ist etwa schon das Weißen von Dächern SRM? Und wäre die Schaffung von Wolken an besonders heißen Tagen über einer begrenzten Fläche, etwa zum Schutz eines Korallenriffs oder im Rahmen der olympischen Spiele auch als SRM einzuordnen? Um zu entscheiden, ob in diesen oder ähnlichen Fällen SRM vorliegt oder nicht, sind die Merkmale des übergeordneten Geoengineering-Begriffs (Kap. 1) heranzuziehen. Zentrales Merkmal des Geoengineering-Begriffs ist die Zielstellung, durch bewusste großskalige Maßnahmen in das Klimasystem einzugreifen. So fehlt beim Weißen von Dächern die gezielte und großflächige Beeinflussung des Klimas. Zielstellung des Weißens von Dächern ist normalerweise die Verbesserung der Lebensbedingungen auf dieser begrenzten Fläche.³ Auch ist eine zeitlich eng **begrenzte Maßnahme zur Beeinflussung des (aktuellen) Wetters nicht mit einer (langfristigen) Änderung des Klimas gleichzusetzen.**

Soweit in Randbereichen des SRM-Begriffs Überschneidungen zur Wetterbeeinflussung und zur Klimaanpassungen verbleiben, ist eine normative Begriffsbestimmung und Regulierung von SRM dennoch möglich. Dass in Einzelfällen eine eindeutige Abgrenzung im Vorhinein nicht immer möglich ist, ist vielmehr typisch für normative und politische Begriffe. Diese haben nicht die Trennschärfe naturwissenschaftlicher Definitionen. Entscheidend ist hier, dass Kriterien vorhanden sind, mit deren Hilfe eine Abwägung und Entscheidung in den dafür vorgesehenen Verfahren in Einzelfällen getroffen werden kann. Der Gesetzgeber oder sonstige Entscheider kann anhand dieser Kriterien ggf. weitere Zuordnungen festsetzen.

9.2 Biodiversitätskonvention und das De-Facto-Geoengineering-Moratorium

Von besonderer Bedeutung für die Steuerung und Regulierung von SRM ist die **Entscheidung unter der Biodiversitätskonvention** (Convention on Biodiversity, CBD) aus dem Jahr 2010, CBD X/33 ((CBD, 2010); (UBA, 2019)). Sie zählt zu den wenigen internationalen Rechtstexten, die SRM ausdrücklich erwähnen. Die Entscheidung wendet das Vorsorgeprinzip auf SRM an und konkretisiert die Kriterien, welche mit Blick auf die Erforschung und Anwendung vorab sichergestellt werden müssten. Dabei sieht die Entscheidung vor, dass SRM nicht stattfinden darf, solange diese Kriterien nicht erfüllt sind. Die Entscheidung wird daher auch als „**De-facto-Moratorium**“ bezeichnet.



³ Eine andere Bewertung könnte aber vorgenommen werden, wenn kleinteilige Veränderungen der Oberflächenalbedo in einen umfassenden Anreiz-Mechanismus zum vermeintlichen „Klimaschutz“ integriert werden und daher aggregiert betrachtet werden müssen.

Wortlaut des CBD X/33 De-Facto-Geoengineering Moratoriums

Art. 8 Buchstabe w fordert die Staatengemeinschaft auf „sicherzustellen dass, in Ermangelung von wissenschaftlichen, globalen, transparenten und effektiven Kontroll- und Regulierungsmechanismen sowie im Einklang mit dem Vorsorgeansatz und Artikel 14 der Biodiversitätskonvention, keine Geoengineering-Aktivitäten, die die Biodiversität beeinträchtigen können, stattfinden, bis diese auf der Grundlage einer hinreichenden wissenschaftlichen Basis gerechtfertigt werden können und eine angemessene Berücksichtigung der damit verbundenen Risiken für die Umwelt und Biodiversität als auch der damit verbundenen sozialen, ökonomischen und kulturellen Auswirkungen gegeben ist.

Ausgenommen hiervon sind kleinskalige Forschungsexperimente, welche in einer kontrollierten Umgebung im Einklang mit Artikel 3 der Biodiversitätskonvention durchgeführt werden, und darüber hinaus notwendig sind, um bestimmte wissenschaftliche Daten zu erhalten und außerdem einer gründlichen vorherigen Prüfung möglicher Umweltrisiken unterzogen worden sind. (Nichtamtliche Übersetzung des UBA).



In Umsetzung des Vorsorgeprinzips stellt die Entscheidung ein **grundsätzliches** Verbot der Anwendung von SRM auf („sicherzustellen, dass...keine Geoengineering Aktivitäten...stattfinden“), das nur bei Vorliegen bestimmter Voraussetzungen aufgehoben werden kann. Das De-Facto-Geoengineering Moratorium stellt also kein bedingungsloses und absolutes Verbot von SRM auf, sondern formuliert Voraussetzungen für die Durchführung von SRM-Aktivitäten.

Von dem in der Entscheidung aufgestellten Verbot darf also nur abgewichen werden, wenn mehrere Bedingungen erfüllt sind. Insbesondere ist ein **hinreichender wissenschaftlicher Konsens** zur Wirkungsweise und den Auswirkungen von SRM erforderlich. Dabei sind auch die „damit verbundenen Risiken für die Umwelt und Biodiversität als auch der damit verbundenen sozialen, ökonomischen und kulturellen Auswirkungen“ einzubeziehen. Nur wenn der Einsatz von SRM auf dieser wissenschaftlichen Basis gerechtfertigt werden könnte, kommt eine Anwendung von SRM also überhaupt in Betracht. Nach dem aktuellen Wissensstand sind die Auswirkungen der vorgeschlagenen SRM-Techniken nicht mit hinreichender Sicherheit bestimmbar. Einige negative Auswirkungen von SRM, wie etwa die Veränderung von Niederschlagsmustern, können jedoch schon mit großer Sicherheit angenommen werden (Kap. 8.5 und 8.6).

Eine weitere Bedingung ist das Vorhandensein von „wissenschaftlichen, globalen, transparenten und effektiven **Kontroll- und Regulierungsmechanismen**“. Dies bedeutet, dass SRM nur durchgeführt werden darf, wenn entsprechende internationale Mechanismen zu Steuerung von SRM geschaffen worden sind. Damit sind insbesondere Alleingänge einzelner Staaten verboten. Von diesem Verbot nimmt der Entscheidungstext „kleinskalige Forschungsexperimente“ in einer „kontrollierten Umgebung“ unter engen Voraussetzungen aus. Bislang besteht kein Konsens, ob lediglich Aktivitäten in Laboren und Wolkenkammern oder andere Eingrenzungsvorkehrungen für Freilandaktivitäten dieser Vorgabe genügen (Rabitz et al., 2022, S. 142). Eine bereichsspezifische Weiterentwicklung der Kriterien erfolgte unter dem London Protokoll (Kap. 10.2).

Exkurs: Status des De-Facto-Geoengineering Moratoriums (Dec. X/33)

Die völkerrechtliche Verbindlichkeit der Entscheidung ist differenziert zu beurteilen, da es sich bei dieser Entscheidung um sog. sekundäres Völkerrecht handelt. Dieses wird auf der Grundlage und gemäß den Vorgaben des verbindlichen Vertrages durch die Staatenvertreter verhandelt und verabschiedet. Die Fragestellung der Verbindlichkeit des Sekundärrechts stellt sich v. a. im Umweltvölkerrecht, in welchem es keine eigenständigen Akteure (Rechtssubjekte) gibt und ein geringerer Institutionalisierungsgrad besteht als es in anderen internationalen Politikbereichen üblich ist (vgl. etwa Weltgesundheitsorganisation oder Internationaler Währungsfonds).

Festzuhalten ist, dass die Entscheidung von sämtlichen Vertragsstaaten auf der 10. Vertragsstaatenkonferenz der Biodiversitätskonvention im Jahr 2010 einstimmig getroffen wurde. Sie beurteilt auf der Grundlage des Art. 23 Abs. 4 CBD die Auslegung und Anwendung der verbindlichen Biodiversitätskonvention. Die Entscheidung der Vertragsstaatenkonferenz ist somit eine völkerrechtliche Norm, welcher ein **normativer Geltungsanspruch** zukommt. Eine undifferenzierte bloße Verneinung der Verbindlichkeit der Entscheidung wird dem nicht gerecht. Insbesondere kann der formale Status der Entscheidung nicht durch die inhaltlichen Eingrenzungen in der Ausformulierung der Pflichten abgeändert oder entkräftet werden. So folgt etwa aus der einleitenden Formulierung („*Invites Parties and other Governments, according to national circumstances and priorities*“) der Entscheidung, dass die einzelnen inhaltlichen Vorgaben unter Berücksichtigung der weiteren Umstände ausgelegt werden sollen. Dies berührt nicht den formalen Verbindlichkeitsstatus der Entscheidung.

* In ähnlicher Weise differenziert auch der Bericht der Royal Society und charakterisiert die Entscheidung als „normative precedent“ Royal Society 2011, S. 32. Zu den Abstufungen völkerrechtlicher Verbindlichkeit vgl. auch Brunnée 2022.

Dieses de-facto Moratorium wurde von den CBD-Vertragsstaaten mehrfach bestätigt, so 2016 (Entscheidung der Vertragsstaatenkonferenz XIII/14) und auch kürzlich auf der letzten Vertragsstaatenkonferenz in Cali, Kolumbien. (Entscheidung XVI/17).

Aufbauend auf den bereits bestehenden Entscheidungen der CBD zu Geoengineering wird diskutiert, ob die CBD als zentrales Regulierungsforum für Geoengineering bzw. SRM geeignet wäre. Hierfür spricht, dass der Anwendungsbereich der Biodiversitätskonvention hinreichend breit ist, um die Auswirkungen der verschiedenen Technologien zu erfassen. Hinzu kommt, dass sie das einzige quasi-universelle Forum ist, welches SRM explizit behandelt. Darüber hinaus sieht die CBD eine Reihe von Kooperations- und

Austauschpflichten im Bereich von Forschung und Technik vor (Art. 17,18 CBD), die geeignet sein könnten, weitere Forschungsbemühungen zu SRM zu koordinieren und zu bewerten (Krüger 2020, S. 331). Einige Autoren attestieren der CBD aber ein zu geringes politisches Gewicht, zumal die USA die CBD nicht ratifiziert hat (Sugiyama/Sugiyama 2010, S. 13; Wirth 2013, (S. 413 (433))). In Abwägung der Vor- und Nachteile dürfte die CBD dennoch als zentrales Regulierungsforum für SRM am besten geeignet sein (Bodle/Oberthür 2014, S. 74; Hubbard 2016, S. 618).

9.3 ENMOD als Vertrag zur grundlegenden Regelung von SRM?

Die "Convention on the Prohibition of Military or Any Other Hostile Use of Environmental Modification Techniques" (ENMOD) von 1978 verbietet die feindliche (hostile) Wettermodifikation und grenzt diese von der Wettermodifikation zu friedlichen Zwecken ab. Die Konvention wurde von 58 Staaten, einschließlich der USA, unterschrieben. Da die großflächige Durchführung von SRM notwendigerweise auch eine Wetterbeeinflussung bewirken würde, wird die Anwendbarkeit der Konvention auf SRM regelmäßig erörtert. Problematisch ist aber die Frage, unter welchen Voraussetzungen eine „feindliche“ Anwendung von SRM vorläge. Einige Autoren vertreten die Ansicht, dass jede SRM-Anwendung, die nachteilige Auswirkungen wie etwa Dürren hat, eine Verletzung der ENMOD-Konvention wäre (Robock 2008). Andere Autoren vertreten die Ansicht, dass der Einsatz von SRM als „friedlich“ im Sinne dieser Konvention zu bewerten wäre und damit nicht unter die Verpflichtungen dieses Vertrages fallen kann (Parson 2014, S. 96).

Im Ergebnis enthält die ENMOD Konvention zahlreiche weitgefaste Rechtsbegriffe („feindlich“, „ernsthafte Auswirkungen“), deren konkrete Anwendung auf SRM sich schwierig gestaltet (Gupta et al., 2024, S. 14; Honegger et al. 2013, S. 130). Gleichzeitig sieht die Konvention auch keine Mechanismen vor, die zur Klärung dieser Fragen beitragen können. **In ihrer aktuellen Form kann die ENMOD-Konvention allenfalls das Verbot von SRM bekräftigen.** Demgegenüber erscheinen die Kriterien der CBD Entscheidung X/33 inhaltlich weitergehend ausdifferenziert. Sie sind als Grundlage und Ausgangspunkt für etwaige internationale Bemühungen zur Weiterentwicklung der Regulierungen von SRM als geeigneter zu beurteilen.

9.4 Klimaschutzrecht

Ob SRM Teil des internationalen Klimaschutzrechts sein kann und soll, wird vielfach diskutiert. Ausgangspunkt für die Beantwortung dieser Frage muss Art. 2 Abs. 1 der Klimarahmenkonvention sein. Dieser Artikel legt die Zielbestimmung des internationalen Klimaschutzrechts fest, nämlich „die **Stabilisierung der Treibhausgaskonzentrationen** in der Atmosphäre“. SRM verändert nicht die Konzentration der Treibhausgas, sondern den Strahlungshaushalt der Erde. SRM ist also **nicht von der Zielstellung des internationalen Klimaschutzrechts erfasst.**

Dennoch wird SRM teilweise als Option zur Erreichung des in Art. 2 ÜvP aufgestellten „Temperaturziels“ eingeordnet und darauf aufbauend das ÜvP als geeignetes Vertragsregime zur internationalen Steuerung von SRM vorgeschlagen (Honegger et al. 2013, S. 134.). Dem ist entgegenzuhalten, dass die Einleitung des Art 2. ÜvP das Temperaturziel ausdrücklich in den Zusammenhang mit der Erreichung der Ziele der Klimarahmenkonvention stellt („Dieses Übereinkommen zielt darauf ab, durch Verbesserung der Durchführung des Rahmenübereinkommens einschließlich seines Zieles...“). Das Temperaturziel hat also die Funktion zu bestimmen, ob die Maßnahmen zur Stabilisierung der Treibhausgaskonzentration hinreichend sind. Im rechtlichen Sinne ist das **1,5 Grad-Ziel also keine eigene Zielstellung, sondern lediglich ein Indikator für die hinreichende Zielverfolgung.** Keinesfalls soll die Festlegung der 1,5 Grad-Grenze eine Abkehr von der Klimaschutzhierarchie bewirken (Krüger 2020, S. 452; offener jedoch: Stoll et al. 2022, S. 432). Das Temperaturziel des ÜvP kann erst recht nicht herangezogen werden, um eine Pflicht zum Einsatz von SRM zu begründen (Krüger 2020, S. 455). **SRM ist also keine Klimaschutzmaßnahme.**

Auch in funktionaler Hinsicht sprechen gewichtige Gründe gegen die Nutzung des internationalen Klimaschutzregimes als zentrales Regulierungsforum für SRM. In Wissenschaft und Praxis wird häufig eingewandt, dass die hochkomplexe internationale Klimaschutzdiplomatie nicht mit einer weiteren Last beschwert werden darf (vgl. Kukonnen/Yamineva 2013, 161(165); Bodle/Oberthür 2014, S. 161.) Außerdem sei eine Schwächung der Bemühungen zur Minderung der Treibhausgaskonzentration zu erwarten, da sich durch die Befassung mit SRM der politische Fokus auf vermeintliche Alternativoptionen richten könnte (vgl. zur mitigation deterrence Kap. 8.2). Schließlich sei zu bedenken, dass das Klimaschutzregime mit seiner Ausrichtung auf den Klimaschutz und die Klimawissenschaften nicht im Stande wäre, mögliche Auswirkungen auf die Biodiversität oder sonstige Umweltaspekte (non-climate issues) angemessen zu bewerten (Bodle/Oberthür 2014, S. 174). Das internationale **Klimaschutzregime ist somit weder in rechtlicher Hinsicht noch in funktionaler Hinsicht geeignet für die Steuerung und Regulierung von SRM.**

10

Regeln, die einzelne SRM-Ansätze begrenzen

10.1 Regeln, die SAI-Aktivitäten begrenzen

Stratosphärische Aerosolinjektionen müssten typischerweise in ca. 20 km Höhe durchgeführt werden, wodurch das Weltraumrecht nicht zur Anwendung kommt. Vielmehr finden die Regelungen zum Schutz der Atmosphäre Anwendung. Da stratosphärische Aerosolinjektionen im Einzelfall sehr unterschiedlich ausgestaltet sein können, lassen sich nur verallgemeinernde Aussagen treffen.

Internationale Regeln zum Schutz der Ozonschicht und zur Luftreinhaltung

Die rahmengebende Konvention zum Schutz der Ozonschicht ist die **Wiener Konvention zum Schutz der Ozonschicht**, die seit 1988 in Kraft ist und mittlerweile universal ratifiziert wurde. In Art. 2 Abs. 2 dieser Konvention verpflichten sich die Staaten u.a., Maßnahmen zu ergreifen, um die Gefährdung der Ozonschicht durch menschliche Aktivitäten zu verhindern. In dem 2022 veröffentlichten „Scientific Assessment of Ozone Depletion“ werden die komplexen Wechselwirkungen zwischen der Ozonschicht und zahlreichen Varianten der Aerosolinjektionen zusammengefasst ([WMO 2022](#), S. 21 ff). Nach jetzigem Kenntnisstand bedeutet die Durchführung von Aerosolinjektionen in den bislang diskutierten Anwendungsvarianten mit hin eine Gefährdung der Ozonschicht und würde dem Schutzzweck der Wiener Konvention zum Schutz der Ozonschicht zuwiderlaufen ([Krüger 2020](#), S. 127; [Rickels 2011](#), S. 101); Staaten haben die Pflicht, die Veränderung der Ozonschicht angemessen abzuwehren.⁴

Das **Montreal Protokoll** zum Schutz der Ozonschicht spezifiziert die Wiener Konvention und listet einzelne Substanzen, die schrittweise reduziert („phase down“) oder ganz abgeschafft werden sollen. Je nach den verwendeten Aerosolen können somit auch die Regelungen des Montreal Protokolls den Einsatz von SRM begrenzen. Die am häufigsten im Zusammenhang mit SAI diskutierten Aerosole, die Sulfataerosole, sind allerdings bislang nicht unter dem Montreal Protokoll gelistet.

Die **Genfer Luftreinhaltekonvention** (LRTAP, Convention on Long Range Transboundary Air Pollution) und ihre Protokolle sollen die grenzüberschreitende Luftverschmutzung reduzieren. Die Konvention wurde in Reaktion auf das Phänomen des sauren Regens entwickelt. Sie wurde als regionale Konvention von 51 europäischen und nordamerikanischen Staaten unterschrieben und ratifiziert. Drei der Protokolle (Helsinki, Oslo, Gothenburg) enthalten Verpflichtungen zur Begrenzung von Sulfat-Emissionen. Für Stratosphärische Aerosolinjektionen unter Verwendung von SO₂ bedeutet dies, dass für die Vertragsstaaten faktisch kein Spielraum für die Freisetzung zusätzlicher Sulfat-Emissionen besteht. Für einige Formen der Stratosphärischen Aerosolinjektionen enthält die Genfer Luftreinhaltekonvention somit wesentliche Restriktionen. Ein Mechanismus zur Abwägung etwaiger kollidierender Interessen ist in der Konvention nicht vorgesehen.

Internationales Luftverkehrsrecht

Die Regelungen für das internationale Luftverkehrsrecht werden von der Civil Aviation Organization (ICAO) auf der Grundlage der „Convention on the International Civil Aviation“ festgelegt. Sie können keine staatlichen Operationen regulieren, wohl aber die Aktivitäten privater Projektträger und Forschungsinstitutionen. [Annex 2](#) der Konvention („Rules of the Air“) legt in Art. 3.1.4 fest: „*Nothing shall be dropped or sprayed from an aircraft in flight except under conditions prescribed by the appropriate authority and as indicated by relevant information, advice and/or clearance from the appropriate air traffic services unit*“. Damit ist ein gezieltes Ausbringen (dropping) von Aerosolen nur erlaubt, soweit es durch die zuständigen Stellen und einschlägigen Vorschriften ausdrücklich erlaubt ist. Bei der Ausarbeitung eines solchen Regelwerkes wären wiederum die bestehenden internationalen Regelungen einzubeziehen.

⁴ Soweit Autoren den „Klimanotfall“ ([Krüger 2020](#), S. 135) in die begrenzende Auslegung der Verpflichtungen einbeziehen, kann dies jedenfalls nicht auf den Text der Wiener Konvention gestützt werden. Überdies würde eine Heranziehung regimefremder Schutzgüter die Völkerrechtsgemäßheit und internationale Akzeptanz des Einsatzes von Aerosolinjektionen voraussetzen, nicht aber begründen können.

Das gilt insbesondere für die Entscheidung CBD X/33. Hiernach wäre **zunächst ein grundsätzliches und ausdrückliches Verbot von SRM festzuschreiben**, bevor überhaupt unter engen Voraussetzungen Ausnahmen zugunsten von Forschungsaktivitäten vorgesehen werden könnte (s. auch Kap. 11.2).

Deutsches und Europäisches Recht: Ausnahmegenehmigungen für Experimente?

Auch wenn angesichts der Vielzahl theoretisch denkbarer Fallkonstellationen keine abschließende rechtliche Beurteilung getroffen werden kann, ist festzustellen, dass sich insbesondere SAI-Aktivitäten **nicht in einem rechtsfreien Raum** bewegen, sondern bereits relevante Verbote und Begrenzungsmöglichkeiten bestehen. In Ausübung ihres Ermessensspielraums sollten Behörden über (Ausnahme-)Genehmigungen für Forschungsexperimente nicht ohne Berücksichtigung der internationalen Vereinbarungen zu SRM entscheiden. Hervorzuheben ist, dass derzeit keine SRM-(Forschungs)-Aktivitäten in Deutschland geplant sind. Die Ausführungen sollen einen Beitrag zu einer in der Literatur stattfindenden Diskussion leisten, ob ein dringender regulatorischer Handlungsbedarf hinsichtlich der Schaffung eines Rechtsrahmens für SRM-Experimente besteht.

Verschiedene Regelungen können in Abhängigkeit vom jeweiligen Einzelfall dazu führen, dass die Aktivität grundsätzlich verboten ist und einem Erlaubnis- oder Genehmigungsvorbehalt unterliegt. Für das Ausbringen von Aerosolen oder Partikeln in der Atmosphäre stellen insbesondere das Luftverkehrsrecht und das Immissionsschutzrecht Begrenzungen auf. So regelt das **Luftverkehrsrecht** die Nutzung des Luftraums durch Luftfahrzeuge.

Da Aerosole nur mithilfe von Luftfahrzeugen wie Ballonen oder Flugzeugen in der Stratosphäre ausgebracht werden können, ist davon auszugehen, dass das Luftverkehrsrecht auf SAI anzuwenden ist. Nach § 13 Abs. 1 der Luftverkehrsordnung (LuftVO) ist das Abwerfen oder Ablassen von Gegenständen oder sonstigen Stoffen aus Luftfahrzeugen grundsätzlich verboten. Das gezielte Ausbringen von Stoffen im Rahmen einer SAI-Aktivität ist somit grundsätzlich verboten. Nach Absatz 2 der Norm kann die örtlich zuständige Luftfahrtbehörde Ausnahmen zulassen, wenn keine Gefahr für Personen oder Sachen besteht. Der Wortlaut der Norm („kann“) zeigt, dass die Behörde verpflichtet ist, eine sogenannte

Ermessensentscheidung zu treffen. Das bedeutet, dass alle relevanten Gesichtspunkte zu berücksichtigen sind; die unmittelbare „Gefahr für Personen oder Sachen“ ist also nicht allein maßgeblich.

Bei Kleinst-Experimenten sind insbesondere auch die mittelbaren Risiken, die von SRM-Aktivitäten insgesamt ausgehen, (s. oben Kap. 8) einzubeziehen. Sodann sind auch die Maßgaben völkerrechtlicher Normen zu berücksichtigen.

Nach dem Grundsatz der Völkerrechtsfreundlichkeit des Grundgesetzes sind völkerrechtliche Normen in die Gesetzesauslegung und Wahrnehmung von Ermessensspielräumen einzubeziehen. Diese Berücksichtigungspflicht gilt sogar für zwischenstaatlich vereinbarte Normen ohne formale völkerrechtliche Bindung (Deutscher Bundestag WD 2018, S. 23). **Bei einer Entscheidung der zuständigen Behörde über die Erteilung einer Ausnahmegenehmigung für Forschungsexperimente wäre daher die Entscheidung CBD X/33 einzubeziehen.** Diese völkerrechtliche Entscheidung (s. oben Kap. 9.3) wurde zudem in der Klimaaußenstrategie der Bundesregierung (Bundesregierung, 2023, S. 58) und der Mitteilung der EU Kommission (EU Kommission, 2023) bestätigt. Überdies wendet die Entscheidung das in Art. 191 AEUV verankerte Vorsorgeprinzip auf Geoengineering-Aktivitäten an.

Bei der Auslegung der nationalen Vorschriften unter Heranziehung der Kriterien der Entscheidung der CBD X/33 ist nach der aktuellen Sach- und Rechtslage davon auszugehen, dass diese der Erteilung einer **Ausnahmegenehmigung** entgegenstehen. Relevante Kriterien sind hiernach das legitime wissenschaftliche Interesse, keine bloße Entwicklung der technischen Infrastruktur, eine gründliche vorherige Prüfung möglicher Umweltrisiken und die Notwendigkeit der Durchführung des Experiments in einer „kontrollierten Umgebung“. Hierbei wäre insbesondere zu bedenken, dass kleinskalige Experimente bislang keinen feststellbaren wissenschaftlichen Erkenntniswert für die Beurteilung der Auswirkungen einer großskaligen SRM-Anwendung auf Wetter und Klima hätten (Kap. 7.3 und DFG; 2014).

Auch kann die Durchführung von Tests mit Spezialflugkörpern oder Ballons zur Entwicklung von Infrastruktur für SAI-Maßnahmen und der Forcierung der Marktreife dieser Maßnahmen führen. Die

technische Vorbereitung und Entwicklung von Infrastrukturen ist jedoch als Vorbereitung der Anwendung abzulehnen (s. Bundesregierung, 2023, S. 58).

Ferner kann das **Bundesimmissionsschutzgesetz** (BImSchG) SAI-Aktivitäten begrenzen. Das gezielte Ausbringen von Aerosolen fällt unter die in § 3 Abs. 4 BImSchG definierten „Luftverunreinigungen“ und verursacht Immissionen im Sinne von § 3 Abs. 2 BImSchG, weil es als Luftverunreinigung auf die Atmosphäre einwirkt, indem es die natürliche Zusammensetzung der Luft verändert. Auch sind Schwefeloxide ausweislich der TA Luft und der 43. BImSchV geeignet schädliche Umwelteinwirkungen herbeizuführen. Nach der 43. BImSchV gelten insbesondere für SO₂ und Feinstaub PM 2,5 summarische Grenzwerte für Emissionen, auch wenn sie nicht aus Anlagen stammen (§ 1 Abs. 1: Punktquellen und diffuse Quellen). Die nach § 2 Abs. 1 der 43. BImSchV geltenden Reduktionspflichten in Bezug auf die Gesamtemissionsmengen sind insoweit auch für SAI-Aktivitäten bindend.

10.2 Regelungen für marines Geo-engineering

Das Londoner Protokoll (LP) zum Londoner Übereinkommen (London Convention, LC) über die Verhütung der Meeresverschmutzung durch das Einbringen von Abfällen und anderen Stoffen von 1972 enthält Regelungen zu marinem Geoengineering. Voraussetzung der Anwendbarkeit von LP ist, dass die Vorhaben mittels Einbringung von Stoffen in das Meer durchgeführt werden. Somit werden nur solche SRM-Aktivitäten von LP erfasst, die eben das Einbringen von „Abfällen oder anderen Materialien“ voraussetzen, wie etwa das Ausbringen von reflektiven Partikeln oder die Verfestigung von Schaum auf der Meeresoberfläche durch die Zugabe von Chemikalien (Kap. 6.4 und 6.5). Durch das Amendment von 2013 wurde der Begriff „marine geo-engineering“ aufgenommen. Den Begriff „SRM“ verwendet der Vertragstext von LP nicht. Das Amendment von 2013 sieht für die CDR-Methode der Meeresdüngung ein Verbot der Anwendung vor. Zulässig sind nur Vorhaben, die erstens als legitime wissenschaftliche Forschung („**legitimate scientific research**“) einzuordnen sind. Das Amendment legt Kriterien für die Unterscheidung von Forschung und (kommerzieller)

Anwendung fest, was ein Novum im internationalen Recht darstellt. So muss nachgewiesen werden, dass das Vorhaben zum „Wissensgewinn“ beiträgt, dass eine anerkannte Forschungsmethode verwendet wird und dass das Vorhaben „peer reviewed“ wurde. Darüber hinaus dürfen das Design und die Durchführung nicht von ökonomischen Interessen beeinflusst sein. Direkte finanzielle Vorteile aus einem Forschungsvorhaben, wie der Verkauf von Zertifikaten sind verboten und schließen aus, dass es sich um „legitimate scientific research“ handelt. Zweitens sieht das Amendment eine **strukturierte Umweltbewertung** vor, um negative Auswirkungen soweit wie möglich zu vermeiden. Und drittens nennt es Anforderungen an die **Konsultation** von potentiell betroffenen Staaten sowie von regionalen Organisationen sowie die Beteiligung internationaler unabhängiger Expert*innen.

Das Amendment ist so strukturiert, dass es für weitere Techniken des marinen Geoengineerings zur Geltung gebracht werden kann. Problematisch ist, dass bislang nur etwas mehr als 50 Staaten das LP gezeichnet haben und dass das Amendment nicht in Kraft getreten ist. Allerdings wenden zahlreiche Staaten, so auch die USA, die Regelungen von LP innerstaatlich an, ohne dass sie LP ratifiziert oder gar gezeichnet zu haben.

Anforderungen für das marine Geoengineering ergeben sich auch aus dem **Seerechtsübereinkommen** (UNCLOS), das immerhin 169 Vertragsstaaten bindet, wie jüngst der Internationale Seegerichtshof mit seinem Rechtsgutachten vom 21.05.2024 gezeigt hat. In seinem von allen Vertragsstaaten (als die zutreffende Interpretation des Seerechts) akzeptierten Gutachten hat der Gerichtshof festgestellt, dass Maßnahmen des marinen Geoengineerings nicht eine Verlagerung von Belastungen von einem Medium in ein anderes Medium verursachen dürfen.⁵

In zwei einstimmig angenommenen Statements von 2022 und 2023 stellen die LP-Vertragsstaaten fest, dass neben einigen CDR-Techniken auch MCB und Microbubbles erhebliche Risiken für die Meeresumwelt haben können und dass daher auch hier ein grundsätzliches Verbot wünschenswert wäre und allenfalls „legitimate scientific research“ erlaubt werden soll. Offen bleibt dabei, ob es sich überhaupt um

⁵ ITLOS Advisory opinion No. 31 v. 21.05.2024, para. 231.

großskalige und klimawirksame SRM-Maßnahmen handelt, oder das Ziel der Maßnahme beispielsweise der Schutz lokaler Korallenriffe wäre.

Darüber hinaus wird diskutiert inwieweit das Regelungskonzept des LP auf SAI-Anwendungen übertragbar sein könnte. Das Regelungskonzept von LP für marines Geo-Engineering beruht auf zwei Säulen: Erstens dem Verbot der Anwendung. Insofern entspricht es dem Gedanken eines Non-Use-Agreements. Die zweite Säule ist die grundsätzliche Zulässigkeit von Feldversuchen, unter strengen Voraussetzungen und einer vorherigen Kontrolle. Die Anforderungen an „legitimate scientific research“ schließen eine ökonomische Verwertung der Ergebnisse von Forschungsvorhaben aus. Es ist zweifelhaft, inwieweit dieses Modell der Regulierung von Feldversuchen für SAI-Aktivitäten hinreichend wäre. Auch dürfte nach aktuellem Kenntnisstand ein legitimes Forschungsinteresse in aller Regel ohnehin zu verneinen sein, da keine belastbaren Erkenntnisse etwa auf die Auswirkungen von Wetterdynamiken und Niederschlagsmustern zu erwarten sind. Die Konzepte des LP wurden ursprünglich vornehmlich für CDR-Maßnahmen geschaffen und können insbesondere nicht ohne weiteres auf SAI übertragen werden. Vor allem würde eine Übertragung der Regelungen und Konzepte des London Protocol auf SAI, als ersten Schritt ein umfassendes und verbindliches Bekenntnis zum grundsätzlichen Verbot von SAI erfordern (siehe auch unten Forschungsregulierung, Kap 11.1).

10.3 Rechtslage im Weltraum

Diskutiert wird die Durchführung von SRM-Maßnahmen auch im Weltraum (Kap. 6.1). Das internationale Weltraumrecht gibt wichtige rahmende Vorgaben für SRM, welche bereits jetzt eine Grundlage für eine regulierende Begrenzung von möglichen SRM Aktivitäten im Weltraum bilden (Baum et al., 2022, S. 6; Krüger 2020, S. 99). Zwar enthält das internationale Weltraumrecht keine Regelungen, die SRM-Aktivitäten explizit verbieten oder regulieren. Dennoch sind einige Grundregeln und prozedurale Vorgaben für SRM Aktivitäten im Weltraum relevant. So enthält der Weltraumvertrag eine „Gemeinwohlklausel“, wonach sämtliche Aktivitäten im Weltraum zum Nutzen aller Staaten durchgeführt werden sollen (Art. I). Hieraus kann abgeleitet werden, dass eine unilaterale und für andere Staaten potentiell schadensbringende SRM-Aktivität nicht durchgeführt werden soll (Rickels 2011, S. 143). Als relevantes Schutzgut wird auch die Umwelt der Erde genannt (Art. IX). Sodann enthält Art. XI Vorgaben zu Konsultationspflichten und verpflichtet zu umfassender Transparenz über alle Aktivitäten. Die Einhaltung dieser Verpflichtungen ist durch nationale Gesetze auch im Falle privater Missionen sicherzustellen. So wird das künftige deutsche Weltraumgesetz eine Genehmigungspflicht für private Aktivitäten vorsehen (BMWK 2024).

10.4 Weitere beschränkende Regelungen

Weitere internationale Regelungen behandeln ebenfalls nicht SRM oder bestimmte Techniken als solches, sondern sind schutzgutbezogen und können einzelne SRM-Aktivitäten in Abhängigkeit von ihren konkret zu befürchtenden Auswirkungen begrenzen. So gebietet das völkerrechtlich anerkannte **Verbot bedeutender grenzüberschreitender Schädigungen**, entsprechend schadensstiftende Aktivitäten zu vermeiden. Sodann können auch die **Menschenrechtskonventionen** SRM begrenzen. So ist nach Einschätzung des Menschenrechtsrats das Ausmaß der potentiellen sozio-ökonomischen Auswirkungen einer globalen SRM-Anwendung nach jetzigem Kenntnisstand nicht mit den Menschenrechten vereinbar (UNGA 2023, para. 46, 61). Eine globale SRM-Anwendung würde nach jetzigem Kenntnisstand somit auch der Verwirklichung der **Sustainable Development Goals** zuwiderlaufen.⁶ Auch zahlreiche regionale Umwelt- und Naturschutzabkommen können durch SRM-Anwendungen berührt und verletzt werden.

10.5 Zwischenfazit

Zusammenfassend ist festzustellen, dass sich die diskutierten SRM-Aktivitäten **nicht in einem rechtsfreien Raum bewegen. Schon heute unterliegen sie sogar zahlreichen signifikanten Beschränkungen** (so auch UNGA 2023, para. 31). Staaten und den nationalen und internationalen Behörden und Institutionen stehen einige **Möglichkeiten zur Verfügung, regulierend einzugreifen**. Die bestehenden Regelungen lassen jedoch große Spielräume offen. Zur Ausfüllung dieser Spielräume ist bereits jetzt die Entscheidung CBD X/33 heranzuziehen.

Aktuell können keine gravierenden Regelungslücken festgestellt werden. Die vorhandenen Regelungen beantworten aber nicht die Frage, in welcher Weise SRM trotz der bestehenden Restriktionen konkret durchgeführt werden könnte. Dies wird von einigen Autor*innen als große Regelungslücke bewertet, insbesondere wenn eher positive Annahmen und Spekulationen über etwaige zukünftige Potentiale und Risiken von SRM zugrunde gelegt werden. Solche Annahmen zu SRM lassen sich jedoch nicht mit dem aktuellen Erkenntnisstand der Wissenschaft begründen.

⁶ Offener jedoch und die Möglichkeit von erfolgreichem SRM annehmend (Honegger et al. 2020, S. 15 ff.).

11

Vorschläge für Regulierung und Steuerung von SRM

11.1 Voranbringen eines Internationalen Nichtnutzungsabkommen

- ▶ **Ein internationales Nicht-Nutzungsabkommen muss vorangebracht werden.**

Um nationale Alleingänge zu verhindern und zukünftige SRM-Aktivitäten zu begrenzen, muss ein Nicht-Nutzungsabkommen (Non-Use-Agreement) vorangetrieben werden. Die Inhalte und Kriterien müssen die Entscheidung unter der Biodiversitätskonvention (CBD X/33 „De-Facto-Geoengineering Moratorium“) weiterentwickeln, ohne diese abzuschwächen. Der Fokus der internationalen Diskussionen und Anstrengungen muss auf der Herstellung eines inhaltlichen Konsenses gerichtet sein. Um widerstreitende Positionen zu überbrücken und die Erfolgchancen für ein Non-Use-Agreement zu verbessern, sollte deutlich gemacht werden, dass ein grundsätzliches Verbot Voraussetzung einer vorsorgeorientierten Regulierung von SRM ist und nur auf dieser Grundlage etwaige künftige Feldexperimente überhaupt reguliert und kontrolliert ermöglicht werden könnten (s. 11.2 Forschungsregulierung).

- ▶ **Eine verbindliche Bestätigung des Geoengineering De-Facto Moratoriums X/33 und plurilaterale Abkommen sind voranzubringen.**

Vor allem wenn ein internationaler Konsens zur Weiterentwicklung der Kriterien noch nicht möglich ist, ist auch eine verbindliche Bestätigung der Entscheidung CBD X/33 ein zielführender Schritt. Ebenso kann eine plurilaterale Übereinkunft ein erster Schritt sein. Diese würde sich zunächst auf eine Gruppe gleichgesinnter Staaten beschränken, die sich für eine vorsorgeorientierte Regulierung einsetzen.

- ▶ **Die Koordinierung und wechselseitige Berücksichtigung der völkerrechtlichen Institutionen müssen verbessert werden.**

Im Fall der Vereinbarung eines internationalen Nicht-Nutzungsabkommens wird die internationale Steuerung und Regulierung von SRM wie schon jetzt auch weiterhin von einer Vielzahl von

Partikularregimen geprägt sein. Die das Völkerrecht in vielen Bereichen ohnehin kennzeichnende Fragmentierung hat gerade bei SRM den Vorteil, dass die verschiedenen Risiken und Perspektiven hinreichende Berücksichtigung finden können. Daher müssen auch die Koordinierung und wechselseitige Berücksichtigung der einzelnen, für SRM relevanten Vertragsregime verbessert werden. Insbesondere sollte kein Partikularregime SRM-Aktivitäten vorantreiben oder bestehende Beschränkungen aufheben, ohne die Einschätzungen und Verpflichtungen anderer Vertragsregime zu berücksichtigen.

11.2 Forschungsregulierung setzt ein Anwendungsverbot voraus

- ▶ **Sollten in Zukunft national, regional oder international Regelungen für eine kontrollierte Durchführungen von SRM-Experimenten erzwungen werden, würde dies die Verankerung eines grundsätzlichen Verbots von SRM voraussetzen. Dies gilt auch im Falle der bloßen Anpassung bestehender Regelungen.**

Die kontrollierte Ermöglichung von Feldexperimenten ist nur auf der Grundlage einer umfassenden Begrenzung der SRM-Anwendungen und -Aktivitäten möglich, auch wenn lediglich kleinst- und kleinskalige Aktivitäten in Rede stehen. Dies ist mit Blick auf die fließenden Übergänge zwischen Forschung und Anwendung erforderlich. Ohne ein Bekenntnis zum Verbot der Anwendung dürfte leicht eine kontinuierliche Ausweitung von Freilandexperimenten erfolgen und Feldexperimente immer größer werden und schließlich eine großflächige Anwendung stattfinden (Kap. 7.3). Vor allem kann eine „Forschungsregulierung“ nur mithilfe eines Anwendungsverbots rechtstechnisch begründet werden. Unter Beachtung der Forschungsfreiheit, die etwa in Deutschland in Art. 5 des Grundgesetzes verankert ist, ist eine begrenzende Regulierung von Forschungsaktivitäten nur denkbar, wenn hinreichende Gefahren für andere verfassungsrechtlich geschützte Rechtsgüter bestehen. Für die Beurteilung von SRM-Aktivitäten und ihrer Auswirkungen spielt es keine Rolle, ob die Aktivität (auch) zu Forschungszwecken durchgeführt oder

als Anwendung bezeichnet wird. Nur diese tatsächliche Aktivität kann verboten werden, nicht aber die Forschung selbst. Der Begriff der Forschungsregulierung kann insofern irreführen. Eine Forschungsregulierung bedeutet, dass vom Verbot einer Aktivität unter qualifizierten Voraussetzungen begrenzte Ausnahmen zum Zweck der Forschung vorgesehen werden können.

Auf nationaler und internationaler Ebene wäre also vor der Schaffung von Regelungen für SRM-Experimente jeweils ein verbindliches Verbot der Durchführung von SRM-Aktivitäten zu verankern. Auch dürfen bestehende Regelungen nicht einfach angepasst werden zugunsten von SRM-Experimenten, ohne zuvor ein grundsätzliches und ausdrückliches Verbot von SRM-Aktivitäten festzuschreiben.

11.3 Regulierung von SAI-Feldexperimenten vorerst nicht notwendig

- ▶ **Die Einführung eines gesetzlich verankerten Verfahrens für die umfangreiche Bewertung von SAI-Forschungs-Projekten und deren wissenschaftlichen Erkenntnisinteressen erscheint aktuell nicht zielführend und geboten.**

Nach der in Deutschland und in anderen EU-Staaten bestehenden Rechtslage dürften SAI-Feldexperimente nicht möglich sein, die Erteilung einer Ausnahmeerlaubnis könnte aber beantragt werden (Kap. 10.1.3). Ein wesentlicher Gesichtspunkt der Behördenentscheidung wäre, ob ein legitimes wissenschaftliches Erkenntnisinteresse dargelegt werden kann. Nach welchen Maßstäben und Kriterien ein solches legitimes Erkenntnisinteresse einer SAI-Aktivität genau darzulegen wäre, ist weder im deutschen noch im EU-Recht konkret ausformuliert. Aktuell wäre auf die völkerrechtliche Entscheidung der Biodiversitätskonvention zurückzugreifen (Kap. 10.1.3). Wobei die Relevanz von Kleinstexperimenten für die Beurteilung der regionalen und globalen Auswirkungen von großskaligen SAI-Aktivitäten wissenschaftlich bezweifelt wird (Kap. 7.2); ein legitimes wissenschaftliches Interesse steht mithin überhaupt in Zweifel.

Eine rechtsförmliche Ausformulierung und Weiterentwicklung dieser Kriterien erscheinen daher aktuell weder geboten noch angemessen. Derzeit besteht in Deutschland auch kein Bedarf, ein solches Verfahren

zu installieren, da keine SAI-Experimente geplant sind. Gegenüber der Durchführung von kleinskaligen Feldexperimenten bestehen außerdem die Alternativen der Durchführung von Experimenten in Laboren, z. B. in Wolkenkammern oder die Beobachtung natürlich stattfindender Phänomene wie etwa Vulkanausbrüche. Schließlich wären auch die **politische Signalwirkung** und Fragen der öffentlichen Akzeptanz im Fall der Schaffung eines europäischen oder deutschen Forschungsrahmens für SRM-Freilandaktivitäten zu bedenken. Tatsächlich ist SRM nach wie vor eine rein theoretische und auch in naher Zukunft – nach vernünftigen Maßstäben – keine einsatzfähige Option. In jedem Fall wäre vor der Schaffung eines Rechtsrahmens für die Durchführung von kleinskaligen SAI-Freilandexperimenten zuvor ein grundsätzliches Verbot von SAI gesetzlich zu verankern (Kap. 11.2).

- ▶ **Die Kriterien zulässiger SAI-Forschung müssen international abgestimmt und vereinbart werden.**

Statt nationale oder regionale Kriterienkataloge für SAI-Forschung, die Feldexperimente ermöglichen könnten, festzulegen, müssten solche Kriterien international vereinbart werden. Sofern Feldexperimente kontrolliert ermöglicht werden sollten, muss die Staatengemeinschaft auf der Grundlage eines grundsätzlichen Verbots von SAI eine weitere Konkretisierung der Kriterien der Entscheidung der Biodiversitätskonvention X/33 vorantreiben. So wäre etwa international abzustimmen, was genau unter einer „kontrollierten Umgebung“ zu verstehen ist. Ob im Falle von SAI überhaupt Feldexperimente dieser Vorgabe genügen können, ist weiterhin zu diskutieren und wäre international zu vereinbaren.

- ▶ **Aktuelle Entwicklungen müssen beobachtet werden.**

Da das bestehende Recht, welches eine mögliche zukünftige Durchführung von SRM-Aktivitäten begrenzt, zersplittert ist und abhängig vom jeweiligen Einzelfall unterschiedlich beurteilt werden kann, sollte das bestehende Recht verstärkt auf Regelungslücken und Kohärenz überprüft werden. Dabei sind aktuelle Entwicklungen zu beobachten und auszuwerten.

11.4 Verantwortungsvolle Finanzierung und -steuerung von Schreibtischforschung

- ▶ **Die Finanzierung von Forschung zu Klimaschutzinstrumenten darf nicht geschwächt werden.**

Um die Anstrengungen zur Stabilisierung der Treibhausgaskonzentrationen nicht zu schwächen, darf eine öffentliche Finanzierung von SRM-Forschung nicht zulasten der Finanzierung der Forschung zu Klimaschutzinstrumenten erfolgen.

- ▶ **Eine öffentliche Finanzierung von SRM Forschung muss in Umfang und Ausrichtung begrenzt werden.**

Für eine große Zurückhaltung in der Erforschung von SRM spricht das „**slippery slope**“ Argument, wonach die umfangreiche Beschäftigung mit SRM zur weiteren Normalisierung von SRM und der Wahrnehmung von SRM als klimapolitische Option beiträgt (Kap. 7.3). Dennoch ist auch der Aufbau einer eigenen, möglichst objektiven, interdisziplinären und kritischen Bewertungskompetenz zu SRM wichtig. Nur so können Vorschläge oder Aktivitäten anderer Akteure fundiert und überzeugend bewertet werden. In Abwägung dieser Gemengelange scheint eine **maßvolle** öffentliche Forschungsfinanzierung von Schreibtischforschung für die Ermittlung der Risiken von SRM angemessen. Die Zielstellung jeglicher SRM-Forschung **muss dabei auf der Erforschung der Risiken** gerichtet sein. Keinesfalls darf dabei die technologische Entwicklung von Infrastrukturen, die für SRM-Aktivitäten benötigt werden, vorangetrieben werden.

- ▶ **Die Ausgewogenheit und Objektivität der Forschungsvorhaben muss sichergestellt und transparent gemacht werden.**

Um Pfadabhängigkeiten und Fehleinschätzungen durch Eigeninteressen zu vermeiden, muss bei der Planung und Finanzierung von Forschungsaktivitäten darauf geachtet werden, eine **breite und interdisziplinäre Auswahl von Expertisen** einzubeziehen und eine besonders **kritische Prüfung von Interessenkonflikten** durchzuführen. Insbesondere kommerzielle Eigeninteressen müssen ausgeschlossen werden. Außerdem sind auch die Quellen der Forschungsfinanzierung der Forschenden offenzulegen. Zudem ist bei der Auswahl der Forschenden für ein SRM-Projekt zu beachten, dass eine objektive und hinreichend kritische wissenschaftliche Bewertung von SRM schwerlich gelingen kann, wenn sich die jeweilige Expertise hauptsächlich auf das Forschungsfeld SRM beschränkt (Kap. 8.3). Die Auswahlentscheidung über die Forschungsprojekte ist entsprechend der genannten Vorgaben zu dokumentieren und öffentlich zu machen.

Quellenverzeichnis

- Aaheim, A., Romstad, B., Wei, T., Kristjánsson, J. E., Muri, H., Niemeier, U., & Schmidt, H. (2015): An economic evaluation of solar radiation management. *Science of The Total Environment*, 532, 61–69. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.05.106>.
- American Geoscience Union (2022): AGU Climate Intervention Engagement leading the Development of an Ethical Framework, Online unter: <https://www.agu.org/-/media/Files/Learn-About-AGU/AGU-Climate-Intervention-Ethical-Framework.pdf> (08.10.2024).
- Akbari, H., Menon, S., & Rosenfeld, A. (2008): Global Cooling: Effect of Urban Albedo on Global Temperature. <https://escholarship.org/uc/item/0pz748p6>.
- Al Hosari, T., Al Mandous, A., Wehbe, Y., Shalaby, A., Al Shamsi, N., Al Naqbi, H., Al Yazeedi, O., Al Mazroui, A., & Farrah, S. (2021): The UAE Cloud Seeding Program: A Statistical and Physical Evaluation. *Atmosphere*, 12(8), Article 8. <https://doi.org/10.3390/atmos12081013>.
- Alizadeh, O. (2022): Advances and challenges in climate modeling. *Climatic Change*, 170(1), 18. <https://doi.org/10.1007/s10584-021-03298-4>.
- Alley, R. B., Marotzke, J., Nordhaus, W. D., Overpeck, J. T., Peteet, D. M., Pielke, R. A., Pierrehumbert, R. T., Rhines, P. B., Stocker, T. F., Talley, L. D., & Wallace, J. M. (2003): Abrupt Climate Change. *Science*, 299(5615), 2005–2010. <https://doi.org/10.1126/science.1081056>.
- African Ministerial Conference on the Environment (2023): Report of the meeting of the nineteenth session of the African Ministerial Conference on the Environment. Online unter: <https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/43789/K2316003E-AMCEN-19-6-ADVANCE-REPORT.pdf?sequence=3>.
- Andow, J. (2023): Slippery Slope Arguments as Precautionary Arguments: A New Way of Understanding the Concern about Geoengineering Research. *Environmental Values*, 32(6), 701–717. <https://doi.org/10.3197/096327123X16702350862737>.
- Argüello, G., Johannson, J. (2022): Ice Management Research and the Arctic Marine Environment in: Regulation of Risk. <https://brill.com/edcollchap-0a/book/9789004518681/BP000003.xml?body=fullhtml-60832>.
- Asimolar Conference (2010): Statement from the Conference's Scientific Organizing Committee. Online unter: https://web.who.edu/ocb-fert/wp-content/uploads/sites/100/2017/07/Asilomar_2.0_statement_62483.pdf.
- Asimolar Conference (2010): Final report. Online unter: <http://climateresponsefund.org/images/Conference/finalfinalreport.pdf>.
- Bakalova, I., & Belaia, M. (2023): Stability of Efficient International Agreements on Solar Geoengineering. *Environmental and Resource Economics*, 86(3), 673–712. <https://doi.org/10.1007/s10640-023-00807-0>.
- Baker, Z., Law, T., Vardy, M., & Zehr, S. (2023): *Climate, Science and Society: A Primer* (1st ed.): Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781003409748>.
- Baum, C. M., Low, S., & Sovacool, B. K. (2022): Between the sun and us: Expert perceptions on the innovation, policy, and deep uncertainties of space-based solar geoengineering. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 158. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112179>.
- Baur, S., Nauels, A., Nicholls, Z., Sanderson, B. M., & Schleussner, C.-F. (2023): The deployment length of solar radiation modification: An interplay of mitigation, net-negative emissions and climate uncertainty. *Earth System Dynamics*, 14(2), 367–381. <https://doi.org/10.5194/esd-14-367-2023>.
- Baur, S., Sanderson, B. M., Séférian, R., & Terray, L. (2023): Solar Radiation Modification challenges decarbonization with renewable solar energy. *EGUsphere*, 1–22. <https://doi.org/10.5194/egusphere-2023-2337>.
- Baur, S., Sanderson, B. M., Séférian, R., & Terray, L. (2024): Change in Wind Renewable Energy Potential under Stratospheric Aerosol Injections. <https://hal.science/hal-04449996>.
- Bednarz, E. M., Butler, A. H., Visoni, D., Zhang, Y., Kravitz, B., & MacMartin, D. G. (2023): Injection strategy – a driver of atmospheric circulation and ozone response to stratospheric aerosol geoengineering. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 23(21), 13665–13684. <https://doi.org/10.5194/acp-23-13665-2023>.
- Bellamy, R., & Palmer, J. (2019): Geoengineering and geographers: Rewriting the Earth in what image? *Area*, 51(3), 524–531. <https://doi.org/10.1111/area.12495>.
- Bewick, R., Lücking, C., Colombo, C., Sanchez, J.P., McInnes, C.R. (2024): Geo-engineering Using Dust Grains in Heliotropic Elliptical Orbits. Online unter: https://strathprints.strath.ac.uk/41236/1/Bewick_R_et_al_Pure_Geo_engineering_using_dust_grains_in_heliotropic_elliptical_orbits_Oct_2011.pdf.
- Bewick, R., Lücking, C., Colombo, C., Sanchez, J. P., & McInnes, C. R. (2013): Heliotropic dust rings for Earth climate engineering. *Advances in Space Research*, 51(7), 1132–1144. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2012.10.024>.
- Biermann, F., Oomen, J., Gupta, A., Ali, S. H., Conca, K., Hajer, M. A., Kashwan, P., Kotzé, L. J., Leach, M., Messner, D., Okereke, C., Persson, Å., Potočnik, J., Schlosberg, D., Scobie, M., & VanDeveer, S. D. (2022): Solar geoengineering: The case for an international non-use agreement. *WIREs Climate Change*, 13(3), e754. <https://doi.org/10.1002/wcc.754>.
- Bingaman, D., Rice, C., Smith, W., Vogel, P. (2020): A Stratospheric Aerosol Injection Lofter Aircraft Concept: Brimstone Angel (world): AIAA SciTech Forum. <https://doi.org/10.2514/6.2020-0618>.
- Bluemling, B., Kim, R. E., & Biermann, F. (2020): Seeding the clouds to reach the sky: Will China's weather modification practices support the legitimization of climate engineering? *Ambio*, 49(1), 365–373. <https://doi.org/10.1007/s13280-019-01180-3>.
- Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (2024): Langfriststrategie Negativemissionen zum Umgang mit unvermeidbaren Restemissionen (LNe) – Eckpunkte. Online unter: https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/E/240226-eckpunkte-negativemissionen.pdf?__blob=publicationFile&v=8.

- Bodansky, D., & Hunt, H. (2020): Arctic Climate Interventions (SSRN Scholarly Paper No. 3657284): <https://papers.ssrn.com/abstract=3657284>.
- Bodle, R., & Oberthür, S. (2014): Options and Proposals for the International Governance of Geoengineering.
- Bolsen, T., Palm, R., & Luke, R. E. (2023): Public response to solar geoengineering: How media frames about stratospheric aerosol injection affect opinions. *Climatic Change*, 176(8), 112. <https://doi.org/10.1007/s10584-023-03575-4>.
- Brody, E., Visoni, D., Bednarz, E. M., Kravitz, B., MacMartin, D. G., Richter, J. H., & Tye, M. R. (2024): Kicking the Can Down the Road: Understanding the Effects of Delaying the Deployment of Stratospheric Aerosol Injection (No. arXiv:2402.11992): arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2402.11992>.
- Brovkin, V., Petoukhov, V., Claussen, M., Bauer, E., Archer, D., & Jaeger, C. (2009): Geoengineering climate by stratospheric sulfur injections: Earth system vulnerability to technological failure. *Climatic Change*, 92(3–4), 243–259. <https://doi.org/10.1007/s10584-008-9490-1>.
- Brunnée, J. (2002): COPing with Consent: Law-Making Under Multilateral Environmental Agreements. *Leiden Journal of International Law*, 15(1), 1–52. <https://doi.org/10.1017/S0922156502000018>.
- Buck, H. J., & Nicholson, S. (2023): Solar geoengineering research in the global public interest: A proposal for how to do it. *One Earth*, 6(12), 1652–1664. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2023.11.012>.
- Budyko, M. (1977): Climatic Changes, American Geophysical Union (AGU): <https://doi.org/10.1002/9781118665251.fmatter>.
- BUND (2023): Geoengineering oder ökologischer Klimaschutz, Klima-Engineering als Technik gewordene menschliche Hybris. Online unter: https://www.bund.net/fileadmin/user_upload_bund/publikationen/klimawandel/geoengineering-oder-oekologischer-klimaschutz-position-bund.pdf.
- Bundesregierung. (2023): Klimaaußenpolitikstrategie. Online unter: <https://www.auswaertiges-amt.de/blob/2633110/7d086ff77b692c97eb0ea82d689d6bd9/kap-strategie-data.pdf>.
- Bundesregierung. (2024): Eckpunkte für ein Weltraumgesetz. Online unter: https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/E/eckpunkte-der-bundesregierung-fuer-ein-weltraumgesetz.pdf?__blob=publicationFile&v=2.
- Caldeira, K., & Bala, G. (2017): Reflecting on 50 years of geoengineering research. *Earth's Future*, 5(1), 10–17. <https://doi.org/10.1002/2016EF000454>.
- Callies, D. E. (2019): The Slippery Slope Argument against Geoengineering Research. *Journal of Applied Philosophy*, 36(4), 675–687. <https://doi.org/10.1111/japp.12345>.
- Chalmin, A. (2024): Global Southwashing: How The Degrees Initiative is imposing its solar geoengineering agenda onto climate research in the Global South, Briefings, Geoengineering Monitor und ETC Group. Online unter: <https://www.geoengineeringmonitor.org/the-degrees-initiative>.
- Climate Action Network (2019): SRM-Position. Online unter: <https://climatenetwork.org/wp-content/uploads/2019/09/CAN-SRM-position.pdf>.
- Carlisle, D. P., Feetham, P. M., Wright, M. J., & Teagle, D. A. H. (2020): The public remain uninformed and wary of climate engineering. *Climatic Change*, 160(2), 303–322. Scopus. <https://doi.org/10.1007/s10584-020-02706-5>.
- Carr, W. A., Preston, C. J., Yung, L., Szerszynski, B., Keith, D. W., & Mercer, A. M. (2013): Public engagement on solar radiation management and why it needs to happen now. *Climatic Change*, 121(3), 567–577. <https://doi.org/10.1007/s10584-013-0763-y>.
- Chalecki, E. L. (2018): A New Security Framework for Geoengineering.
- Climate Overshoot Commission. (2023): Reducing the Risks of Climate Overshoot. Online unter: https://www.overshootcommission.org/_files/ugd/0c3b70_bab3b3c1cd394745b387a594c9a68e2b.pdf.
- Claudel, C., Lockley, A., Hoffmann, F., & Xia, Y. (2024). Marine-cloud brightening: An airborne concept. *Environmental Research Communications*, 6(3), 035020. <https://doi.org/10.1088/2515-7620/ad2f71>.
- Corry, O. (2017): The international politics of geoengineering: The feasibility of Plan B for tackling climate change—Olaf Corry, 2017. <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0967010617704142>.
- Couce, E., Irvine, P. J., Gregoire, L. J., Ridgwell, A., & Hendy, E. J. (2013): Tropical coral reef habitat in a geoengineered, high-CO2 world. *Geophysical Research Letters*, 40(9), 1799–1805. <https://doi.org/10.1002/grl.50340>.
- Council of the European Union (2023): General Secretariat of the Council, Geoengineering – Playing the sorcerer’s apprentice? – Geopolitical risks of a race to control the climate, Publications Office of the European Union, 2023, <https://data.europa.eu/doi/10.2860/842606>. Online unter: [geoengineering-playing-the-sorcerers-apprentice-ext.pdf \(europa.eu\)](https://data.europa.eu/doi/10.2860/842606)
- Crook, J. A., Jackson, L. S., & Forster, P. M. (2016): Can increasing albedo of existing ship wakes reduce climate change? *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 121(4), 1549–1558. <https://doi.org/10.1002/2015JD024201>.
- Crutzen, P. (2006): Albedo Enhancement by Stratospheric Sulfur Injections: A Contribution to Resolve a Policy Dilemma? - ProQuest. <https://www.proquest.com/openview/9f0a629d28adf a02e164457e63fb7e6b/1?pq-origsite=gscholar&cbl=36297>.
- Cummings, C. L., Lin, S. H., & Trump, B. D. (2017): Public perceptions of climate geoengineering: A systematic review of the literature. *Climate Research*, 73(3), 247–264. <https://doi.org/10.3354/cr01475>.
- Davies, G. (2020): Climate Change and Reversed Intergenerational Equity: The Problem of Costs Now, for Benefits Later. *Climate Law*, 10(3–4), 266–281. <https://doi.org/10.1163/18786561-10030002>.
- Deutscher Bundestag (2018): Eckpunkte und völkerrechtliche Bedeutung des Global Compact for Safe, Orderly and Regular Migration, wissenschaftliche Dienste. Online unter: <https://www.bundestag.de/resource/blob/586216/db5f5f55b8add66aff370e02e66ef322/WD-2-165-18-pdf.pdf>.
- Deutsche Forschungsgemeinschaft, Veränderung der Wolken—SPP Climate Engineering. Website-Artikel. Online unter: <https://www.spp-climate-engineering.de/index.php/Veraenderung-der-Wolken.html>.

- Deutsche Forschungsgemeinschaft (2012): Climate Engineering: Forschungsfragen einer gesellschaftlichen Herausforderung, Gemeinsame Stellungnahme. Online unter: https://www.spp-climate-engineering.de/index.php/stellungnahme_climate_engineering_120403cbdd-2.pdf?file=files/ce-projekt/media/files/stellungnahme_climate_engineering_120403.pdf.
- Deutsche Forschungsgemeinschaft (2014): Modellierung in der Climate Engineering Forschung - Aussagekräftig trotz Unsicherheiten. Online unter: https://www.spp-climate-engineering.de/index.php/Modellierung_in_der_CE_Forschung62cb-2.pdf?file=files/ce-projekt/media/download_PDFs/Modellierung_in_der_CE_Forschung.pdf.
- Deutsche Forschungsgemeinschaft (2019): Climate Engineering und unsere Klimaziele – eine überfällige Debatte. Online unter: https://www.spp-climate-engineering.de/index.php/climateengineering_spp1689_brosch2fc1-2.pdf?file=files/ce-projekt/media/download_PDFs/climateengineering_spp1689_brosch.pdf.
- Deutsche Forschungsgemeinschaft (2019): Overview on modelling in the SPP 1689. Online unter: https://www.spp-climate-engineering.de/index.php/SPP1689_MODELLING_overviewce2d.pdf?file=files/ce-projekt/media/download_PDFs/SPP1689_MODELLING_overview.pdf.
- Deutscher Wetterdienst (2021): Thema des Tages—Die Quasi-Biennale Oszillation (QBO), Website-Artikel. Online unter: https://www.dwd.de/DE/wetter/thema_des_tages/2021/9/4.html
- Diamond, M.S., Wanser, K. & Boucher, O. “Cooling credits” are not a viable climate solution. *Climatic Change* 176, 96 (2023). <https://doi.org/10.1007/s10584-023-03561-w>.
- Drdla, K., & Müller, R. (2012). Temperature thresholds for chlorine activation and ozone loss in the polar stratosphere. *Annales Geophysicae*, 30(7), 1055–1073. <https://doi.org/10.5194/angeo-30-1055-2012>.
- IISD (2024): Summary of the Sixth Session of the Open-ended Committee of Permanent Representatives and the United Nations Environment Assembly: 19 February – 1 March 2024, Earth Negotiations Bulletin Vol. 16 No. 176. Online unter: <https://enb.iisd.org/sites/default/files/2024-03/enb16176e.pdf>
- Enevoldsen, P., Baum, C. M., Low, S., & Sovacool, B. K. (2022): Examining the synergies and tradeoffs of net-zero climate protection with the Sustainable Development Goals. *Science Progress*, 105(4), 00368504221138443. <https://doi.org/10.1177/00368504221138443>
- European Space Agency (2024.): ESA’S ANNUAL SPACE ENVIRONMENT REPORT. Online unter: https://www.sdo.esa.int/environment_report/Space_Environment_Report_latest.pdf
- European Commission (2022): High Representative of the Union for Foreign Affairs and Security Policy. EU COMMISSION, Oxford Encyclopedia of EU Law. Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/law-oeel/e66.013.66>
- European Council (2024): Proposal for a Regulation of the European Parliament and of the Council establishing a Union certification framework for carbon removals - Letter to the Chair of the European Parliament Committee on the Environment, Public Health and Food Safety (ENVI). Online unter: <https://data.consilium.europa.eu/doc/document/ST-7514-2024-INIT/en/pdf>
- European Parliament (2023): P9_TA(2023)0407 – UN Climate Change Conference 2023 in Dubai, United Arab Emirates (COP28) – European Parliament resolution of 21 November 2023 on the UN Climate Change Conference 2023 in Dubai, United Arab Emirates (COP28) (2023/2636(RSP)) (OJ C, C/2024/4210, 24.07.2024, ELI: <https://eur-lex.europa.eu/eli/C/2024/4210/oj>, Footnote 92. Online unter: https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/TA-9-2023-0407_EN.html /.
- Fan, Y., Tjiputra, J., Muri, H., Lombardozi, D., Park, C.-E., Wu, S., & Keith, D. (2021): Solar geoengineering can alleviate climate change pressures on crop yields. *Nature Food*, 2(5), Article 5. <https://doi.org/10.1038/s43016-021-00278-w>
- Farkas, J., Molid, M., Hansen, B. H., Nordam, T., Nordtug, T., Carvalho, P. A., & Throne-Holst, M. (2023): Characterization of hollow glass microspheres with potential for regional climate intervention to preserve snow and ice surfaces. *Cold Regions Science and Technology*, 215, 103967. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2023.103967>
- Fasullo, J. T., & Richter, J. H. (2023): Dependence of strategic solar climate intervention on background scenario and model physics. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 23(1), 163–182. <https://doi.org/10.5194/acp-23-163-2023>
- Feingold, G., Ghatge, V. P., Russell, L. M., Blossey, P., Cantrell, W., Christensen, M. W., Diamond, M. S., Gettelman, A., Glassmeier, F., Gryspeerd, E., Haywood, J., Hoffmann, F., Kaul, C. M., Lebsock, M., McComiskey, A. C., McCoy, D. T., Ming, Y., Mülmenstädt, J., Possner, A., ... Zheng, X. (2024): Physical science research needed to evaluate the viability and risks of marine cloud brightening. *Science Advances*, 10(12), eadi8594. <https://doi.org/10.1126/sciadv.adi8594>
- Feldmann, J., Levermann, A., Mengel, M. (2019): Stabilizing the West Antarctic Ice Sheet by surface mass deposition. *Sci. Adv.* 5. DOI:10.1126/sciadv.aaw4132
- Field, L., Ivanova, D., Bhattacharyya, S., Mlaker, V., Sholtz, A., Decca, R., Manzara, A., Johnson, D., Christodoulou, E., Walter, P., & Katuri, K. (2018): Increasing Arctic Sea Ice Albedo Using Localized Reversible Geoengineering. *Earth’s Future*, 6(6), 882–901. <https://doi.org/10.1029/2018EF000820>
- Flossmann, A. I., Manton, M., Abshaev, A., Brintjies, R., Murakami, M., Prabhakaran, T., & Yao, Z. (2019): Review of Advances in Precipitation Enhancement Research. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 100(8), 1465–1480. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-18-0160.1>
- Floyd, R. (2023): Solar Geoengineering: The View from Just War/Securitization Theories. *Journal of Global Security Studies*, 8(2), ogad012. <https://doi.org/10.1093/jogss/ogad012>
- Foken, T. (2016): *Angewandte Meteorologie*. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-25525-0>
- Fotso-Nguemo, T. C., Chouto, S., Nghonda, J. P., Diedhiou, A., Kravitz, B., Yepdo, Z. D., Djuidje, F. K., & Abiodun, B. J. (2024): Projected impact of solar radiation modification geoengineering on water deficit risk over major Central African river basins. *Environmental Research Letters*, 19(9), 094046. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ad657d>
- Frie, E., Gilmer, S., Buraga, B., & Franceschini, K. (2022): Quantifying the Albedo of the Montreal Island and its Potential for Increase. *McGill Science Undergraduate Research Journal*, 17(1), Article 1. <https://doi.org/10.26443/msurj.v17i1.175>

- Fröb, F., Sonntag, S., Pongratz, J., Schmidt, H., & Ilyina, T. (2020): Detectability of Artificial Ocean Alkalinization and Stratospheric Aerosol Injection in MPI-ESM. *Earth's Future*, 8(10): Scopus. <https://doi.org/10.1029/2020EF001634>
- Fruh, K., & Hedahl, M. (2019): Climate Change is Unjust War: Geoengineering and the Rising Tides of War. *The Southern Journal of Philosophy*, 57(3), 378–401. <https://doi.org/10.1111/sjp.12338>
- Gabriel, C. J., Robock, A., Xia, L., Zambri, B., & Kravitz, B. (2017): The G4Foam Experiment: Global climate impacts of regional ocean albedo modification. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 17(1), 595–613. <https://doi.org/10.5194/acp-17-595-2017>
- Gardiner, S.M. (2010): Is “Arming the Future” with Geoengineering Really the Lesser Evil? Some Doubts About the Ethics of Intentionally Manipulating the Climate System (SSRN Scholarly Paper No. 1357162): <https://papers.ssrn.com/abstract=1357162>
- Gardiner, S. M. (2011): Some Early Ethics of Geoengineering the Climate: A Commentary on the Values of the Royal Society Report. *Environmental Values*.
- Gardiner, S. M. (2013): Geoengineering and Moral Schizophrenia: What Is the Question? In A. L. Strauss & W. C. G. Burns (Eds.), *Climate Change Geoengineering: Philosophical Perspectives, Legal Issues, and Governance Frameworks* (pp. 11–38): Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139161824.003>
- Gekkieva, S. O., & Atabieva, F. A. (2021): Assessment of the influence of anti-hail protection on environmental pollution on the example of open water bodies of the republic of Moldova. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 840(1), 012037. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/840/1/012037>
- Genesio, L., Bassi, R., & Miglietta, F. (2021): Plants with less chlorophyll: A global change perspective. *Global Change Biology*, 27(5), 959–967. <https://doi.org/10.1111/gcb.15470>
- Gottelman, A., & Rood, R. B. (2016): *Demystifying Climate Models: A Users Guide to Earth System Models* (Vol. 2): Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-48959-8>
- GESAMP (2019): High level review of a wide range of proposed marine geoengineering techniques. (Boyd, P.W. and Vivian, C.M.G., eds.). Rep. Stud. GESAMP No. 98, 144 p.. Online unter: <http://www.gesamp.org/site/assets/files/1723/rs98e.pdf>.
- Gramstad, K., & Tjøtta, S. (2010): Climate Engineering: Cost benefit and beyond. Online unter: [Climate engineering: cost benefit and beyond Munich Personal RePEc Archive \(uni-muenchen.de\)](http://www.munich-personal-repec-archiv.de/urn:muenchen.de)
- Gruber, S., Blahak, U., Haanel, F., Kottmeier, C., Leisner, T., Muskatel, H., Storelvmo, T., & Vogel, B. (2019): A Process Study on Thinning of Arctic Winter Cirrus Clouds With High-Resolution ICON-ART Simulations. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 124(11), 5860–5888. <https://doi.org/10.1029/2018JD029815>
- Gupta, A., Biermann, F., Driel, E. van, Bernaz, N., Jayaram, D., Kim, R. E., Kotzé, L. J., Ruddigkeit, D., VanDeveer, S. D., & Wewerinke-Singh, M. (2024): Towards a Non-Use Regime on Solar Geoengineering: Lessons from International Law and Governance. *Transnational Environmental Law*, 13(2), 368–399. <https://doi.org/10.1017/S2047102524000050>
- Gupta, A., & Möller, I. (2019): De facto governance: How authoritative assessments construct climate engineering as an object of governance. *Environmental Politics*, 28(3), 480–501. <https://doi.org/10.1080/09644016.2018.1452373>
- Hamilton, C. (2013): *Earthmasters: The Dawn of the Age of Climate Engineering*. Yale University Press.
- Hausfather, Z., & Peters, G. P. (2020): Emissions – the ‘business as usual’ story is misleading. *Nature*, 577(7792), 618–620. <https://doi.org/10.1038/d41586-020-00177-3>
- Haywood, J. M., Jones, A., Jones, A. C., Halloran, P., & Rasch, P. J. (2023): Climate intervention using marine cloud brightening (MCB) compared with stratospheric aerosol injection (SAI) in the UKESM1 climate model. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 23(24), 15305–15324. <https://doi.org/10.5194/acp-23-15305-2023>.
- Heinrich Boell Stiftung (2018): Ein zivilgesellschaftliches Briefing zur Governance von Geoengineering Dem Geo-Sturm standhalten. Online unter: https://www.boell.de/sites/default/files/hbf_etc_geogovern_briefing_de.pdf.
- Heinrich Boell Stiftung (2018): Irrweg Geoengineering Ein zivilgesellschaftliches Briefing. Online unter: https://www.boell.de/sites/default/files/hbs_etc_irrweg_geoeng_de.pdf.
- Heinrich Boell Stiftung (2021), Veränderung der Oberflächenalbedo, Analysen rund ums Thema Geoengineering. Online unter: https://www.boell.de/sites/default/files/2021-01/GM_Oberfl%C3%A4chenalbedo.pdf.
- Heinrich Boell Stiftung (2021) Aufhellung von Meereswolken, Analysen rund ums Thema Geoengineering. Online unter: https://www.boell.de/sites/default/files/2021-01/GM_MCB_de.pdf
- Heinrich Boell Stiftung (2021) Ausdünnen von Zirruswolken, Analysen rund ums Thema Geoengineering. Online unter: https://www.boell.de/sites/default/files/2021-01/GM_Zirruswolken.pdf.
- Heinrich Boell Stiftung (2021) Mikrobläschen/Meeresschaum, Analysen rund ums Thema Geoengineering. Online unter: https://www.boell.de/sites/default/files/2021-01/GM_Mikrobl%C3%A4schen.pdf.
- Heinrich Boell Stiftung (2021) Stratospheric Aerosol Injection (SAI), Analysen rund ums Thema Geoengineering. Online unter: https://www.boell.de/sites/default/files/2021-01/GM_SAI_de.pdf.
- Goudie, A., Middleton, N. J. (2006): *Desert dust in the global system*. Springer. Online unter: <https://link.springer.com/book/10.1007/3-540-32355-4>.
- Heyen, D., Horton, J., Moreno-Cruz, J. (2019): Strategic implications of counter-geoengineering: Clash or cooperation? *Journal of Environmental Economics and Management*, 95, 153–177, ISSN 0095-0696, <https://doi.org/10.1016/j.jeem.2019.03.005>.
- Heyward, C. (2013): Situating and Abandoning Geoengineering: A Typology of Five Responses to Dangerous Climate Change. *PS: Political Science & Politics*, 46(01), 23–27. <https://doi.org/10.1017/S1049096512001436>
- Honegger, M., Michaelowa, A., & Pan, J. (2021): Potential implications of solar radiation modification for achievement of the Sustainable Development Goals. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 26(5), 21. <https://doi.org/10.1007/s11027-021-09958-1>
- Honegger, M., Sugathapala, K., & Michaelowa, A. (2013): Tackling Climate Change: Where Can the Generic Framework Be Located?

- Carbon & Climate Law Review, 7(2), 125–135. <https://doi.org/10.21552/CCLR/2013/2/254>
- Horton, J. B. (2011): Geoengineering and the Myth of Unilateralism: Pressures and Prospects for International Cooperation. Online unter: <https://law.stanford.edu/wp-content/uploads/2018/05/horton.pdf>.
- Hubbard, M. (2016): Barometer Rising: The Cartagena Protocol on Biosafety as a Model For Holistic International Regulation of Ocean Fertilization Projects and Other Forms of Geoengineering. *William & Mary Environmental Law and Policy Review*, 40(2), 591. <https://scholarship.law.wm.edu/wmelpr/vol40/iss2/9>
- Hulme, M. (2014): Can science fix climate change? A case against climate engineering. Polity Press. ISBN: 9780745685267.
- IPCC (2021): Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2391 pp. doi:10.1017/9781009157896.
- IPCC (2018): Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 616 pp. <https://doi.org/10.1017/9781009157940>.
- IPCC (2014): Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Frequently Asked Questions – Part of the Working-Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)], Stämpfli Publikationen AG, Bern, Switzerland, 66 pp.
- Irvine, P., Emanuel, K., He, J., Horowitz, L. W., Vecchi, G., & Keith, D. (2019): Halving warming with idealized solar geoengineering moderates key climate hazards. *Nature Climate Change*, 9(4), 295–299. <https://doi.org/10.1038/s41558-019-0398-8>.
- Iseman, L. (2023): Mexico, Make Sunsets, Blog-Artikel. Online unter: <https://makesunsets.com/blogs/news/mexico>.
- International Union on Geophysics and Geodesy (2023): Resolution 4: Weather and Climate Engineering Based on the Addition of Aerosol Particles, General Assembly Resolutions. Online unter: https://iugg.org/wp-content/uploads/2023/09/2023_IUGG-GA-Resolutions.pdf.
- Izdebski, A., Haldon, J., & Filipkowski, P. (Eds.): (2022): Perspectives on Public Policy in Societal-Environmental Crises: What the Future Needs from History. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-94137-6>.
- Jacobson, M. Z., & Hovee, J. E. T. (2012): Effects of Urban Surfaces and White Roofs on Global and Regional Climate. *Journal of Climate*, 25(3), 1028–1044. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-11-00032.1>.
- Jamieson, D. (1996): Ethics and intentional climate change. *Climatic Change*, 33(3), 323–336. <https://doi.org/10.1007/BF00142580>.
- Janssens, M., de Vries, I. E., Hulshoff, S. J., & DSE 16-02. (2020): A specialised delivery system for stratospheric sulphate aerosols: Design and operation. *Climatic Change*, 162(1), 67–85. <https://doi.org/10.1007/s10584-020-02740-3>.
- Jinnah, S., & Moreno-Cruz, J. (2023): Should solar geoengineering be used to address climate change? An ethics bowl-inspired approach. In *Teaching Environmental Justice* (pp. 103–120): Edward Elgar Publishing. <https://www.elgaronline.com/edcollchap-oa/book/9781789905069/book-part-9781789905069-17.xml>.
- Jinnah, S., Talati, S., Bedsworth, L., Gerrard, M., Kleeman, M., Lempert, R., Mach, K., Nurse, L., Patrick, H. O., & Sugiyama, M. (2024): Do small outdoor geoengineering experiments require governance? *Science*, 385(6709), 600–603. <https://doi.org/10.1126/science.adn2853>.
- Johnson, L., Diaz, C., McNutt, L., Wallace, D., & Wilson, J. (n.d.): The NASA Solar Cruiser Solar Sail System – Ready for Heliophysics and Deep Space Mission, Präsentation. Online unter: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20230007241/downloads/The%20NASA%20Solar%20Cruiser%20Solar%20Sail%20System%20-%20ISSS%202023%20Presentation%20-%20Les%20Johnson.pdf>.
- Jones, A. C., Haywood, J. M., & Jones, A. (2016): Climatic impacts of stratospheric geoengineering with sulfate, black carbon and titania injection. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 16(5), 2843–2862. <https://doi.org/10.5194/acp-16-2843-2016>.
- Jones, A., Haywood, J. M., Alterskjær, K., Boucher, O., Cole, J. N. S., Curry, C. L., Irvine, P. J., Ji, D., Kravitz, B., Egill Kristjánsson, J., Moore, J. C., Niemeier, U., Robock, A., Schmidt, H., Singh, B., Tilmes, S., Watanabe, S., & Yoon, J. (2013): The impact of abrupt suspension of solar radiation management (termination effect) in experiment G2 of the Geoengineering Model Intercomparison Project (GeoMIP): *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(17), 9743–9752. <https://doi.org/10.1002/jgrd.50762>.
- Klepper, G., & Rickels, W. (2012): The Real Economics of Climate Engineering. *Economics Research International*, 2012, 1–20. <https://doi.org/10.1155/2012/316564>.
- Kortetmäki, T., & Oksanen, M. (2023): Right to Food and Geoengineering. *Journal of Agricultural and Environmental Ethics*, 36(1), 5. <https://doi.org/10.1007/s10806-023-09898-7>.
- Kravitz, B., Caldeira, K., Boucher, O., Robock, A., Rasch, P. J., Alterskjær, K., Karam, D. B., Cole, J. N. S., Curry, C. L., Haywood, J. M., Irvine, P. J., Ji, D., Jones, A., Kristjánsson, J. E., Lunt, D. J., Moore, J. C., Niemeier, U., Schmidt, H., Schulz, M., ... Yoon, J.-H. (2013): Climate model response from the Geoengineering Model Intercomparison Project (GeoMIP): *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(15), 8320–8332. <https://doi.org/10.1002/jgrd.50646>.
- Kravitz, B., Robock, A., Boucher, O., Schmidt, H., Taylor, K. E., Stenchikov, G., & Schulz, M. (2011): The Geoengineering Model Intercomparison Project (GeoMIP): *Atmospheric Science Letters*, 12(2), 162–167. <https://doi.org/10.1002/asl.316>.
- Krüger, H. R. J. (2020): Geoengineering und Völkerrecht. In *Ein Beitrag zur Regulierung des klimabezogenen Geoengineerings* (pp. 1–509): Mohr Siebeck GmbH & Co. KG. <https://doi.org/10.1628/978-3-16-158989-8>.

- KSchellSmith. (2021, January 15): Potential obstruction of climate change mitigation through ISO standard on radiative forcing management. Brown Climate Social Science Network. <https://cssn.org/potential-obstruction-of-climate-change-mitigation-through-iso-standard-on-radiative-forcing-management/>.
- Kuebbeler, M., U. Lohmann, and J. Feichter (2012), Effects of stratospheric sulfate aerosol geo-engineering on cirrus clouds, *Geophys. Res. Lett.*, 39, L23803, doi:10.1029/2012GL053797.
- Kumler, A., Kravitz, B., Draxl, C., Vimmerstedt, L., Benton, B., Lundquist, J. K., Martin, M., Buck, H. J., Wang, H., Lennard, C., & Tao, L. (2025): Potential effects of climate change and solar radiation modification on renewable energy resources. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 207, 114934. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114934>.
- Kuokkanen, T., & Yamineva, Y. (2013): 'Regulating Geoengineering in International Environmental Law. *Carbon & Climate Law Review*, 7(3), 161–167. <https://doi.org/10.21552/CCLR/2013/3/261>.
- Kwiatkowski, L., Cox, P., Halloran, P. R., Mumby, P. J., & Wiltshire, A. J. (2015): Coral bleaching under unconventional scenarios of climate warming and ocean acidification. *Nature Climate Change*, 5(8), 777–781. <https://doi.org/10.1038/nclimate2655>.
- Laakso, A., Niemeier, U., Visioni, D., Tilmes, S., & Kokkola, H. (2022): Dependency of the impacts of geoengineering on the stratospheric sulfur injection strategy – Part 1: Intercomparison of modal and sectional aerosol modules. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 22(1), 93–118. <https://doi.org/10.5194/acp-22-93-2022>.
- Latham, J. (1990): Control of global warming? *Nature*, 347(6291), Article 6291. <https://doi.org/10.1038/347339b0>.
- Lawrence, M. G., Schäfer, S., Muri, H., Scott, V., Oschlies, A., Vaughan, N. E., Boucher, O., Schmidt, H., Haywood, J., & Scheffran, J. (2018): Evaluating climate geoengineering proposals in the context of the Paris Agreement temperature goals. *Nature Communications*, 9(1), Article 1. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-05938-3>.
- Umweltbundesamt (2016): *Geo-Engineering: Untersuchung und Bewertung von Methoden zum Geo-Engineering, die die Zusammensetzung der Atmosphäre beeinflussen, Reihe Texte 25/2016*. Online unter: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/geo-engineering>.
- Lesch, H., Scorza-Lesch, C., & Theis-Bröhl, K. (2021): *Den Klimawandel verstehen: Ein Sketchnote-Buch*. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-62804-1>.
- Lin, A. C. (2015): The Missing Pieces of Geoengineering Research Governance. *Minnesota Law Review*, 100, 2509. <https://heinonline.org/HOL/Page?handle=hein.journals/mnlr100&id=2573&div=&collection=>.
- Lockett, T. R., Castillo-Rogez, J., Johnson, L., Matus, J., Lightholder, J., Mariman, A., & Few, A. (2020): Near-Earth Asteroid Scout Flight Mission. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 35(3), 20–29. <https://doi.org/10.1109/MAES.2019.2958729>.
- Lockley, A., Wolovick, M., Keefer, B., Gladstone, R., Zhao, L.-Y., & Moore, J. C. (2020): Glacier geoengineering to address sea-level rise: A geotechnical approach. *Advances in Climate Change Research*, 11(4), 401–414. <https://doi.org/10.1016/j.accre.2020.11.008>.
- Lockyer, A., & Symons, J. (2019): The national security implications of solar geoengineering: An Australian perspective. *Australian Journal of International Affairs*, 73(5), 485–503. <https://doi.org/10.1080/10357718.2019.1662768>.
- Lou, X., Shi, Y., Sun, J., Xue, L., Hu, Z., Fang, W., & Liu, W. (2012): Cloud-resolving model for weather modification in China. *Chinese Science Bulletin*, 57(9), 1055–1061. <https://doi.org/10.1007/s11434-011-4934-9>.
- Lozán, J. L., Graßl, H., Breckle, S.-W., Kasang, D., & Quante, M. (Eds.): (2023): *Warnsignal Klima: Hilft Technik gegen die Erderwärmung? wissenschaftliche Fakten. Wissenschaftliche Auswertungen*.
- Ludwig, M., Moreno-Martinez, A., Hölzel, N., Pebesma, E., & Meyer, H. (2023): Assessing and improving the transferability of current global spatial prediction models. *Global Ecology and Biogeography*, 32(3), 356–368. <https://doi.org/10.1111/geb.13635>.
- MacCracken, M. C. (2009): On the possible use of geoengineering to moderate specific climate change impacts. *Environmental Research Letters*, 4(4), 045107. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/4/4/045107>.
- MacCracken, M. C., Shin, H.-J., Caldeira, K., & Ban-Weiss, G. A. (2013): Climate response to imposed solar radiation reductions in high latitudes. *Earth System Dynamics*, 4(2), 301–315. <https://doi.org/10.5194/esd-4-301-2013>.
- MacMartin, D. G., Caldeira, K., & Keith, D. W. (2014): Solar geoengineering to limit the rate of temperature change. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 372(2031), 20140134. <https://doi.org/10.1098/rsta.2014.0134>.
- Mahajan, A., Tingley, D., & Wagner, G. (2019): Fast, cheap, and imperfect? US public opinion about solar geoengineering. *Environmental Politics*, 28(3), 523–543. Scopus. <https://doi.org/10.1080/09644016.2018.1479101>.
- Marchetti, C. (1977): On geoengineering and the CO2 problem. *Climatic Change*, 1(1), 59–68. <https://doi.org/10.1007/BF00162777>.
- Matthews, H. D., & Turner, S. E. (2009): Of mongooses and mitigation: Ecological analogues to geoengineering. *Environmental Research Letters*, 4(4), 045105. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/4/4/045105>.
- McKinnon. (2019): Sleepwalking into lock-in? Avoiding wrongs to future people in the governance of solar radiation management research: *Environmental Politics: Vol 28, No 3—Get Access*. <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/09644016.2018.1450344?scroll=top&needAccess=true>.
- Mercer, A. M., Keith, D. W., & Sharp, J. D. (2011): Public understanding of solar radiation management. *Environmental Research Letters*, 6(4), 044006. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/6/4/044006>.
- Secretaría de Medio Ambiente Y Recursos Naturales (2023): *México antepone el principio precautorio y la justicia climática en la experimentación con geoingeniería solar, Comunicado conjunto*. Online unter: https://conahcyt.mx/wp-content/uploads/comunicados/Conahcyt_374.pdf.
- Meyer, H., & Pebesma, E. (2022): Machine learning-based global maps of ecological variables and the challenge of assessing them. *Nature Communications*, 13(1), Article 1. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-29838-9>.

- Michaelowa, A. (2021): Solar Radiation Modification—A “Silver Bullet” Climate Policy for Populist and Authoritarian Regimes? *Global Policy*, 12(S1), 119–128. <https://doi.org/10.1111/1758-5899.12872>.
- Millard-Ball. (2012): The Tuvalu Syndrome. Can Geoengineering Solve Climate’s Collective Action Problem? By Adam Millard-Ball: SSRN. https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=20281661.
- Minunno, R., Andersson, N., & Morrison, G. M. (2023): A systematic literature review considering the implementation of planetary geoengineering techniques for the mitigation of sea-level rise. *Earth-Science Reviews*, 241, 104431. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2023.104431>.
- Morton, O. (2009): Crops that cool. *Nature*. <https://doi.org/10.1038/news.2009.33>.
- Müller-Hansen, F., Repke, T., Baum, C. M., Brutschin, E., Callaghan, M. W., Debnath, R., Lamb, W. F., Low, S., Lück, S., Roberts, C., Sovacool, B. K., & Minx, J. C. (2023): Attention, sentiments and emotions towards emerging climate technologies on Twitter. *Global Environmental Change*, 83, 102765. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2023.102765>.
- Muraca, B., & Neuber, F. (2018): Viable and convivial technologies: Considerations on Climate Engineering from a degrowth perspective. *Journal of Cleaner Production*, 197, 1810–1822. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.04.159>.
- National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine (2021): Reflecting Sunlight: Recommendations for Solar Geoengineering Research and Research Governance. Washington, DC: The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/25762>.
- National Center of Meteorology United Arab Emirates Rain Enhancement program (2023): 5th Cycle Solicitation UAE RESEARCH PROGRAM FOR RAIN ENHANCEMENT SCIENCE. Online unter: <https://www.uaerep.ae/resources/uaerep-program-solicitation-c5-en.pdf>.
- Neuber, F., & Ott, K. (2020): The Buying Time Argument within the Solar Radiation Management Discourse. *Applied Sciences*, 10(13), 4637. <https://doi.org/10.3390/app10134637>.
- In-Space Servicing, Assembly and Manufacturing Interagency Working Group of the National Science and Technology Council (2022): National In-Space Servicing, Assembly, and Manufacturing Implementation Plan. Online unter: <https://www.whitehouse.gov/wp-content/uploads/2022/12/NATIONAL-ISAM-IMPLEMENTATION-PLAN.pdf>.
- Oldfield, J. D. (2013): Climate modification and climate change debates among Soviet physical geographers, 1940s-1960s. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 4(6), 513–524. Scopus. <https://doi.org/10.1002/wcc.242>.
- Oleson, K. W., Bonan, G. B., & Feddema, J. (2010): Effects of white roofs on urban temperature in a global climate model. *Geophysical Research Letters*, 37(3): <https://doi.org/10.1029/2009GL042194>.
- Oomen, J. (2021). *Imagining Climate Engineering: Dreaming of the Designer Climate* (1st ed.). Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781003043553>.
- Oomen, J., & Meiske, M. (2021): Proactive and reactive geoengineering: Engineering the climate and the lithosphere. *WIREs Climate Change*, 12(6), e732. <https://doi.org/10.1002/wcc.732>.
- Office of Science and Technology Policy (2023). *Congressionally Mandated Research Plan and an Initial Research Governance Framework Related to Solar Radiation Modification*. Office of Science and Technology Policy, Washington, DC, USA. Online unter: <https://www.whitehouse.gov/wp-content/uploads/2023/06/Congressionally-Mandated-Report-on-Solar-Radiation-Modification.pdf>.
- Garcidiego Ortega, E., Evans, JR. (2018) On the energy required to maintain an ocean mirror using the reflectance of foam. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*, 233(1):388-397. <https://doi.org/10.1177/1475090217750442>.
- Owen, R. (2014): Solar Radiation Management and the Governance of Hubris. In R. M. Harrison & R. E. Hester (Eds.), *Geoengineering of the Climate System* (pp. 212–248): The Royal Society of Chemistry. <https://doi.org/10.1039/9781782621225-00212>.
- Pamplany, A., Gordijn, B., & Brereton, P. (2020): The Ethics of Geoengineering: A Literature Review. *Science and Engineering Ethics*, 26(6), 3069–3119. <https://doi.org/10.1007/s11948-020-00258-6>.
- Parker, A., & Irvine, P. J. (2018): The Risk of Termination Shock From Solar Geoengineering. *Earth’s Future*, 6(3), 456–467. <https://doi.org/10.1002/2017EF000735>.
- Parson, E. A. (2014): Climate Engineering in Global Climate Governance: Implications for Participation and Linkage. *Transnational Environmental Law*, 3(1), 89–110. <https://doi.org/10.1017/S2047102513000496>.
- Parson, E. A., & Ernst, L. N. (2013): International Governance of Climate Engineering. *Theoretical Inquiries in Law*, 14(1), 307–338. <https://doi.org/10.1515/til-2013-015>.
- Planetary Sunshade Foundation (2023): STATE OF SPACE-BASED SOLAR RADIATION MANAGEMENT. Online unter: <https://static1.squarespace.com/static/60d495bac7a14f7e7507d20b/t/640e2f02e1eea35daa618c40/1678651140758/PSF+++State+of+Space-based+solar+radiation+management.pdf>.
- Pongratz, J., Lobell, D. B., Cao, L., & Caldeira, K. (2012): Crop yields in a geoengineered climate. *Nature Climate Change*, 2(2), 101–105. <https://doi.org/10.1038/nclimate1373>.
- Possner. (2023): Impfen von Wolken zur Erhöhung der Reflektivität – Konzepte, Potenziale und Risiken | ZFDM Repository. <https://www.fdr.uni-hamburg.de/record/12858>.
- Preston, C. J. (2013): Ethics and geoengineering: Reviewing the moral issues raised by solar radiation management and carbon dioxide removal. *WIREs Climate Change*, 4(1), 23–37. <https://doi.org/10.1002/wcc.198>.
- Proctor, J., Hsiang, S., Burney, J., Burke, M., & Schlenker, W. (2018): Estimating global agricultural effects of geoengineering using volcanic eruptions. *Nature*, 560(7719), Article 7719. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0417-3>.
- Quaas, M. F., Quaas, J., Rickels, W., & Boucher, O. (2017): Are there reasons against open-ended research into solar radiation management? A model of intergenerational decision-making under uncertainty. *Journal of Environmental Economics and Management*, 84, 1–17. <https://doi.org/10.1016/j.jeem.2017.02.002>.

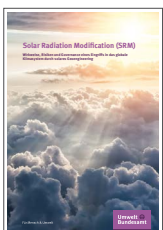
- Rabitz, F., Reynolds, J. L., & Tsioumani, E. (2022): Emerging Technologies in Biodiversity Governance: Gaps and Opportunities for Transformative Governance. In I. J. Visseren-Hamakers & M. T. J. Kok (Eds.), *Transforming Biodiversity Governance* (pp. 137–154): Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781108856348>.
- Rahmstorf, S. (2019): Rahmstorf, Stefan / Schellnhuber, Hans Joachim | *Der Klimawandel*. ISBN: 978-3-406-74376-4.
- Raimi, K. T. (2021): Public perceptions of geoengineering. *Current Opinion in Psychology*, 42, 66–70. <https://doi.org/10.1016/j.copsyc.2021.03.012>.
- Reynolds, J., Ghosh, A., Harihar, N., Jain, P. (2022). *Solar Radiation Modification: Governance gaps and challenges*. Carnegie Climate Governance Initiative (C2G), March, New York, NY: www.c2g2.net.
- Reynolds, J. L. (2019): *The Governance of Solar Geoengineering*. <https://doi.org/10.1017/9781316676790>.
- Ricke, K., Wan, J. S., Chen, C.-C.-J., Tilmes, S., Luongo, M. T., & Richter, J. H. (2023): Unexpected failure of regional marine cloud brightening in a warmer world. *Research Square*. Scopus. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3250111/v1>.
- Rickels, W.; Klepper, G.; Doern, J.; Betz, G.; Brachatzek, N.; Cacean, S.; Güssow, K.; Heintzenberg J.; Hiller, S.; Hoose, C.; Leisner, T.; Oeschles, 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. Online unter: https://www.ifw-kiel.de/fileadmin/Dateiverwaltung/IfW-Publications/fis-import/b7259d3b-e9e8-4887-ae1a-17425bed8f33-CE_gesamtstudie.pdf.
- Rickels, W., Quaas, M. F., Ricke, K., Quaas, J., Moreno-Cruz, J., & Smulders, S. (2020): Who turns the global thermostat and by how much? *Energy Economics*, 91, 104852. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2020.104852>.
- Ridgwell, A., Singarayer, J. S., Hetherington, A. M., & Valdes, P. J. (2009): Tackling Regional Climate Change By Leaf Albedo Bio-geoengineering. *Current Biology*, 19(2), 146–150. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2008.12.025>.
- Robock, A. (2008): 20 Reasons Why Geoengineering May Be a Bad Idea. <https://doi.org/10.2968/064002006>.
- Roy, K. (2022): The solar shield concept: Current status and future possibilities. *Acta Astronautica*, 197, 368–374. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2022.02.022>.
- Royal Society (2011): *Solar Radiation Management: The Governance of Research*. ISBN: 978-0-85403-933-3.
- Schäfer, S.; Lawrence, M.; Stelzer, H.; Born, W.; Low, S.; Aaheim, A.; Adriázola, P.; Betz, G.; Boucher, O.; Cariou, 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.; Oeschles, 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*. Funded by the European Union's Seventh Framework Programme under Grant Agreement 306993.
- Schellnhuber, H. J. (2011): Geoengineering: The good, the MAD, and the sensible. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108(51), 20277–20278. <https://doi.org/10.1073/pnas.1115966108>.
- Schneider, L. (2019): Fixing the Climate? How Geoengineering Threatens to Undermine the SDGs and Climate Justice. *Development (Basingstoke)*, 62(1–4), 29–36. Scopus. <https://doi.org/10.1057/s41301-019-00211-6>.
- Schweiz (2019): *Geoengineering and its governance, Resolution for consideration at the 4th United Nations Environment Assembly*. Online unter: https://geoengineering.environment.harvard.edu/files/sgrp/files/draft_unea_resolution.pdf.
- Scott, L., Leger, D., Borncamp, D., Bryson, S., Corwin, P. E., Sissman, M. C., & Centers, R. (2023): Practical Space Resource Utilization at the Hundred Megatonne Scale: Enabling a Planetary Sunshade to Reverse Global Warming. 408–422. <https://doi.org/10.1061/9780784484470.038>.
- Shepherd, J.G., Working Group on Geoengineering the Climate (2009) *Geoengineering the climate: science, governance and uncertainty* (RS Policy document, 10/29) London, GB. Royal Society 98pp. ISBN: 978-0-85403-773-5.
- Simon, M., McDonald, J., & Brent, K. (2023): Transboundary Implications of China's Weather Modification Programme. *Transnational Environmental Law*, 12(3), 594–622. <https://doi.org/10.1017/S2047102523000146>.
- Smith, C. J., Crook, J. A., Crook, R., Jackson, L. S., Osprey, S. M., & Forster, P. M. (2017): Impacts of Stratospheric Sulfate Geoengineering on Global Solar Photovoltaic and Concentrating Solar Power Resource. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 56(5), 1483–1497. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-16-0298.1>.
- Smith, J. P., Dykema, J. A., & Keith, D. W. (2018): Production of Sulfates Onboard an Aircraft: Implications for the Cost and Feasibility of Stratospheric Solar Geoengineering. *Earth and Space Science*, 5(4), 150–162. <https://doi.org/10.1002/2018EA000370>.
- Smith, W. (2020): The cost of stratospheric aerosol injection through 2100. *Environmental Research Letters*, 15(11), 114004. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aba7e7>.
- Smith, W. (2024): An assessment of the infrastructural and temporal barriers constraining a near-term implementation of a global stratospheric aerosol injection program. *Environmental Research Communications*, 6(6), 061007. <https://doi.org/10.1088/2515-7620/ad4f5c>.
- Smith, W., & Wagner, G. (2018): Stratospheric aerosol injection tactics and costs in the first 15 years of deployment. *Environmental Research Letters*, 13(12), 124001. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aae98d>.
- Sovacool, B. K. (2021): Reckless or righteous? Reviewing the sociotechnical benefits and risks of climate change geoengineering. *Energy Strategy Reviews*, Volume 35, 100656, ISSN 2211-467X, <https://doi.org/10.1016/j.esr.2021.100656>.
- Sovacool, B. K., Baum, C., & Low, S. (2023): The next climate war? Statecraft, security, and weaponization in the geopolitics of a low-carbon future. *Energy Strategy Reviews*, 45, 101031. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2022.101031>.

- Steinke, I., Schorr, T., & Leisner, T. (2024): Using cloud chamber experiments and numerical simulations to investigate the complexities of cirrus cloud thinning effectiveness (Nos. EGU24-9732): EGU24. Copernicus Meetings. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu24-9732>.
- Stoll, P., Krüger, H. (2022): Klimawandel, in Proelß, Alexander (Hrsg.), Internationales Umweltrecht 2. Auflage, S. 431.
- Storelvmo T., Kristjansson J.E., Muri H., Pfeffer M., Barahona D., Nenes A. (2013): Cirrus cloud seeding has potential to cool climate, *Geophysical Research Letters*, 40 (1), pp. 178 - 182, DOI: 10.1029/2012GL054201
- Sugiyama, M., & Sugiyama, T. (n.d.): Interpretation of CBD COP10 decision on geoengineering. Online unter: https://www.researchgate.net/publication/266216766-Interpretation_of_CBD_COP10_decision_on_geoengineering.
- Surprise, K., & Sapinski, J. (2023). Whose climate intervention? Solar geoengineering, fractions of capital, and hegemonic strategy. *Capital & Class*, 47(4), 539-564. <https://doi.org/10.1177/03098168221114386>.
- Sütterlin, B., & Siegrist, M. (2017): Public perception of solar radiation management: The impact of information and evoked affect. *Journal of Risk Research*, 20(10), 1292-1307. <https://doi.org/10.1080/13669877.2016.1153501>.
- Svabik, O. (1989): Review of meteorological aspects on hail defense activities in Austria. *Theoretical and Applied Climatology*, 40(4), 247-254. <https://doi.org/10.1007/BF00865975>.
- Szapudi. (2023): Solar radiation management with a tethered sun shield. <https://doi.org/10.1073/pnas.2307434120>.
- Terry, J. P., Al Ruheili, A., Almarzooqi, M. A., Almheiri, R. Y., & Alshehhi, A. K. (2023): The rain deluge and flash floods of summer 2022 in the United Arab Emirates: Causes, analysis and perspectives on flood-risk reduction. *Journal of Arid Environments*, 215, 105013. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2023.105013>.
- The Alliance for Just Deliberation on Solar Geoengineering (2023): A Justice-Based Analysis of Solar Geoengineering & Capacity Building. Online unter: https://sgdeliberation.org/wp-content/uploads/2023/04/DSG-Whitepaper_Justice.pdf.
- Tilmes, S., Fasullo, J., Lamarque, J.-F., Marsh, D. R., Mills, M., Alterskjær, K., Muri, H., Kristjánsson, J. E., Boucher, O., Schulz, M., Cole, J. N. S., Curry, C. L., Jones, A., Haywood, J., Irvine, P. J., Ji, D., Moore, J. C., Karam, D. B., Kravitz, B., ... Watanabe, S. (2013): The hydrological impact of geoengineering in the Geoengineering Model Intercomparison Project (GeoMIP): *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(19), 11,036-11,058. <https://doi.org/10.1002/jgrd.50868>.
- Tilmes, S., Garcia, R. R., Kinnison, D. E., Gettelman, A., & Rasch, P. J. (2009): Impact of geoengineered aerosols on the troposphere and stratosphere. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 114(D12): <https://doi.org/10.1029/2008JD011420>.
- Tollefson, J. (2021): Can artificially altered clouds save the Great Barrier Reef? *Nature*, 596(7873), 476-478. <https://doi.org/10.1038/d41586-021-02290-3>.
- Trisos, C. H., Amatulli, G., Gurevitch, J., Robock, A., Xia, L., & Zambri, B. (2018): Potentially dangerous consequences for biodiversity of solar geoengineering implementation and termination. *Nature Ecology & Evolution*, 2(3), Article 3. <https://doi.org/10.1038/s41559-017-0431-0>.
- Tuana, N. (2018): The ethical dimensions of geoengineering, Solar radiation management through sulphate particle injection in *Geoengineering our Climate? Ethics, Politics, and Governance*. <https://doi.org/10.4324/9780203485262>.
- Tully, C., Neubauer, D., Omanovic, N., & Lohmann, U. (2022): Cirrus cloud thinning using a more physically based ice microphysics scheme in the ECHAM-HAM general circulation model. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 22(17), 11455-11484. <https://doi.org/10.5194/acp-22-11455-2022>.
- Tzempelikos, A., & Lee, S. (2021): Cool Roofs in the US: The Impact of Roof Reflectivity, Insulation and Attachment Method on Annual Energy Cost. *Energies*, 14(22), Article 22. <https://doi.org/10.3390/en14227656>.
- Umweltbundesamt (2011): Geo-Engineering—Wirksamer Klimaschutz oder Größenwahn? Online unter: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/geo-engineering-wirksamer-klimaschutz-groessenwahn>.
- Umweltbundesamt (2019): Fact Sheet: Das De Facto-Moratorium für Geoengineering unter der Biodiversitätskonvention. Online unter: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/2378/dokumente/factsheet_cbd_moratorium_12_02_2019.pdf.
- Umweltbundesamt (2023): SRM Governance Workshop Report. Online unter: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/3521/dokumente/governance_report_deutsche_ubersetzung.pdf
- Umweltbundesamt (2024): Solar Radiation Modification (SRM): Intractable Governance and Uncertain Science, discussion paper. Online unter: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/solar-radiation-modification-srm-intractable>
- Ünal, E. I. (2021): Public participation in science and technology: a proposal for global deliberation on stratospheric aerosol injection (SAI) [Thesis]. Online unter: [https://risc01.sabanciuniv.edu/record=b2578914_\(Table%20of%20contents\)](https://risc01.sabanciuniv.edu/record=b2578914_(Table%20of%20contents)).
- United Nation Environmental Assembly (2024): Proposed clustering of draft resolutions and decisions I Preparatory process towards the OECPR-6 and UNEA-6 I version 1. Online unter: <https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/44379/Proposed-clustering-for-draft-resolutions-and-decisions.pdf>.
- United Nations Environment Programme (2023). One Atmosphere: An independent expert review on Solar Radiation Modification research and deployment. Kenya, Nairobi. Online unter: https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/41903/one_atmosphere.pdf?sequence=3&isAllowed=y.
- United Nations General Assembly Human Rights Council (2023): Impact of new technologies intended for climate protection on the enjoyment of human rights Report of the Human Rights Council Advisory Committee. Online unter: <https://documents.un.org/doc/undoc/gen/g23/141/86/pdf/g2314186.pdf>
- United Nations Framework Convention on Climate Change (2016): Paris Agreement. Online unter: https://unfccc.int/sites/default/files/resource/parisagreement_publication.pdf.
- Vaughan, N., Fuss, S., Buck, H., Schenuit, F., Pongratz, J., Schulte, I., Lamb, W. F., Probst, B., Edwards, M., Nemet, G. F., Cox, E., Smith, S., Inji Johnstone, Geden, O., Burke, J., Gidden, M., Roe, S., Müller-Hansen, F., & Minx, J. (2024): The State of Carbon Dioxide Removal—2nd Edition. <https://doi.org/10.17605/OSF.IO/F85QJ>.

- Visioni, D., Kravitz, B., Robock, A., Tilmes, S., Haywood, J., Boucher, O., Lawrence, M., Irvine, P., Niemeier, U., Xia, L., Chiodo, G., Lennard, C., Watanabe, S., Moore, J. C., & Muri, H. (2023): Opinion: The scientific and community-building roles of the Geoengineering Model Intercomparison Project (GeoMIP) – past, present, and future. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 23(9), 5149–5176. <https://doi.org/10.5194/acp-23-5149-2023>.
- Visioni, D., MacMartin, D. G., Kravitz, B., Boucher, O., Jones, A., Lurton, T., Martine, M., Mills, M. J., Nabat, P., Niemeier, U., Séférian, R., & Tilmes, S. (2021): Identifying the sources of uncertainty in climate model simulations of solar radiation modification with the G6sulfur and G6solar Geoengineering Model Intercomparison Project (GeoMIP) simulations. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 21(13), 10039–10063. <https://doi.org/10.5194/acp-21-10039-2021>.
- Visioni, D., Robock, A., Haywood, J., Henry, M., Tilmes, S., MacMartin, D. G., Kravitz, B., Doherty, S. J., Moore, J., Lennard, C., Watanabe, S., Muri, H., Niemeier, U., Boucher, O., Syed, A., Egbebiyi, T. S., Séférian, R., & Quaglia, I. (2024): G6-1.5K-SAI: A new Geoengineering Model Intercomparison Project (GeoMIP) experiment integrating recent advances in solar radiation modification studies. *Geoscientific Model Development*, 17(7), 2583–2596. <https://doi.org/10.5194/gmd-17-2583-2024>.
- Visschers, V. H. M., Shi, J., Siegrist, M., & Arvai, J. (2017): Beliefs and values explain international differences in perception of solar radiation management: Insights from a cross-country survey. *Climatic Change*, 142(3–4), 531–544. <https://doi.org/10.1007/s10584-017-1970-8>.
- Vukajlovic, J., Wang, J., Forbes, I., & Šiller, L. (2021): Diamond-doped silica aerogel for solar geoengineering. *Diamond and Related Materials*, 117, 108474. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2021.108474>.
- Waeber, O. (1995): *Securitization and Desecuritization, On Security*, Chapter 3. Online unter: <https://www.libraryofsocialscience.com/assets/pdf/Waeber-Securitization.pdf>.
- Wagner, G. (2023): *Geoengineering: The Gamble*, oekom Verlag, ISBN: 978-3-96238-416-6 <https://gwagner.com/books/geoengineering-the-gamble/>.
- Wan, J. S., Chen, C.-C. J., Tilmes, S., Luongo, M. T., Richter, J. H., & Ricke, K. (2024): Diminished efficacy of regional marine cloud brightening in a warmer world. *Nature Climate Change*, 14(8), 808–814. <https://doi.org/10.1038/s41558-024-02046-7>.
- Wanser, K. (2017). *Solar Geoengineering to Reduce Warming in the Earth System: The Imperative for Research*. Written testimony for the US House Science, Space, and Technology Committee Hearing on Geoengineering. Online unter: <https://climateviewer.com/downloads/Kelly-Wanser-Testimony-geoengineering-innovation-research-technology-2017.pdf>.
- Wieners, C. E., Hofbauer, B. P., De Vries, I. E., Honegger, M., Visioni, D., Russchenberg, H. W. J., & Felgenhauer, T. (2023): Solar radiation modification is risky, but so is rejecting it: A call for balanced research. *Oxford Open Climate Change*, 3(1), kgad002. <https://doi.org/10.1093/oxfclm/kgad002>.
- Wieners, C., Pflüger, D., Kampenhout, L. van, Wijngaard, R., & Dijkstra, H. (2024): Imperfect emergency brake: Can delayed Solar Radiation Modification revert AMOC and SPG weakening? (Nos. EGU24-13381): EGU24. Copernicus Meetings. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu24-13381>.
- Wirth, D. A. (2013): *Engineering the Climate: Geoengineering as a Challenge to International Governance* (SSRN Scholarly Paper No. 2451223): <https://papers.ssrn.com/abstract=2451223>.
- World Commission on the Ethics of Scientific Knowledge and Technology (2023): Report COMEST on the ethics of climate engineering—UNESCO Digital Library. https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000386677?mc_cid=ee096c1e69.
- World Economic Forum (2022): *The Global Risk Report 2022*. Online unter: https://www3.weforum.org/docs/WEF_The_Global_Risks_Report_2022.pdf
- World Economic Forum (2023): *The Global Risk Report 2023*. Online unter: https://www3.weforum.org/docs/WEF_Global_Risks_Report_2023.pdf
- World Economic Forum (2024): *The Global Risk Report 2024*. Online unter: https://www3.weforum.org/docs/WEF_The_Global_Risks_Report_2024.pdf
- World Meteorological Organization (2022): *Executive Summary. Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2022*, GAW Report No. 278, 56 pp.; WMO: Geneva, Online unter: <https://ozone.unep.org/system/files/documents/Scientific-Assessment-of-Ozone-Depletion-2022-Executive-Summary.pdf>
- World Meteorological Organization (2019): *Peer Review Report on Global Precipitation Enhancement Activities*. Online unter: https://filecloud.wmo.int/share/s/_ujeyRLhRxGYsN05nO6X_Q
- Xia, L., Robock, A., Cole, J., Curry, C. L., Ji, D., Jones, A., Kravitz, B., Moore, J. C., Muri, H., Niemeier, U., Singh, B., Tilmes, S., Watanabe, S., & Yoon, J.-H. (2014): Solar radiation management impacts on agriculture in China: A case study in the Geoengineering Model Intercomparison Project (GeoMIP): *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 119(14), 8695–8711. <https://doi.org/10.1002/2013JD020630>.
- Yang, H., Dobbie, S., Ramirez-Villegas, J., Feng, K., Challinor, A. J., Chen, B., Gao, Y., Lee, L., Yin, Y., Sun, L., Watson, J., Koehler, A.-K., Fan, T., & Ghosh, S. (2016): Potential negative consequences of geoengineering on crop production: A study of Indian groundnut. *Geophysical Research Letters*, 43(22), 11,786–11,795. <https://doi.org/10.1002/2016GL071209>.
- Young, D. N. (2023): Considering stratospheric aerosol injections beyond an environmental frame: The intelligible ‘emergency’ techno-fix and preemptive security. *European Journal of International Security*, 8(2), 262–280. <https://doi.org/10.1017/eis.2023.4>.
- Yue, C., Jevrejeva, S., Qu, Y., Zhao, L., & Moore, J. C. (2023): Thermosteric and dynamic sea level under solar geoengineering. *Npj Climate and Atmospheric Science*, 6(1), Article 1. <https://doi.org/10.1038/s41612-023-00466-4>.
- Zhao, M., Cao, L., Duan, L., Bala, G., & Caldeira, K. (2021): Climate More Responsive to Marine Cloud Brightening Than Ocean Albedo Modification: A Model Study. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 126(3), e2020JD033256. <https://doi.org/10.1029/2020JD033256>.

Liste völkerrechtlicher Verträge

Kurztitel	Offizieller Titel	Quelle
CBD /Biodiversitäts-konvention	Convention on Biological Diversity, 5 June 1992, entered into force on 29 December 1993	United Nations Treaty Series, vol. 1760, S. 79
ENMOD Konvention	Convention on the Prohibition of Military Use of Environmental Modification Techniques, 10 December 1976, entered into force on 5 October 1978	United Nations Treaty Series, vol. 1108, S. 151
Genfer Luftreinhalte-konvention/CLRTAPIener	Convention on Long-range Transboundary Air Pollution, 13 November 1979, entered into force on 16 March 1983	United Nations Treaty Series, vol. 1302, S. 217.
Gothenburg Protokoll	Protocol to the 1979 Convention on Long-range Transboundary Air Pollution to Abate Acidification, Eutrophication and Ground-level Ozone, 30 November 1999, entered into force on 17 May 2005	Document of the Economic and Social Council EB.AIR/1999/1
Helsinki Protokoll	Protocol to the 1979 Convention on Long-Range Transboundary Air pollution on the Reduction of Sulphur Emissions or their Transboundary Fluxes by at least 30 per cent, 14 June 1985, entered into force on 2 September 1987	United Nations Treaty Series, vol. 1480, S. 215
Klimarahmenkonvention	United Nations Framework Convention on Climate Change, 9 May 1992, entered into force 21 March 1994	United Nations Treaty Series, vol. 1771, S. 107
LC/ London Konvention	Convention on the Prevention of Marine Pollution by Dumping of Wastes and Other Matter, 29 December 1972, in force on 30 August 1975	United Nations Treaty Series, vol. 1046, S. 120
LP/ London Protokoll	Protocol to the Convention on the Prevention of Marine Pollution by Dumping of Wastes and Other Matter, 07 November 1996, entered into force on 24 March 2006	36 ILM (1997)
Pariser Klimaübereinkommen (ÜvP)	Paris Agreement to the United Nations Framework Convention on Climate Change	United Nations Treaty Series, vol. 3156, S. 79
Weltraumvertrag	Treaty on Principles Governing the Activities of States in the Exploration and Use of Outer Space, Including the Moon and Other Celestial Bodies, 19 December 1966, entered into force on 10 October 1967	United Nations Treaty Series, vol. 610, S. 205
Wiener Konvention zum Schutz der Ozonschicht	Vienna Convention for the Protection of the Ozone Layer, 22 March 1985, entered into force 22 September 1988	United Nations Treaty Series, vol. 1513, S. 293



► **Unsere Broschüren als Download**

Kurzlink: bit.ly/2dowYYI