

CLIMATE CHANGE

52/2024

Diskussionspapier

Zwischen politischer Unwägbarkeit und ungewisser Forschung: Solar Radiation Modification (SRM)

von:

Dr. Jeroen Oomen, Milena Niesen
Utrecht University, Netherlands

Herausgeber:

Umweltbundesamt

CLIMATE CHANGE 52/2024

AA-Forschungsplan des Auswärtigen Amtes

Forschungskennzahl 3721 41 506 0

FB001568

Diskussionspapier

Zwischen politischer Unwägbarkeit und ungewisser Forschung: Solar Radiation Modification (SRM)

von

Dr. Jeroen Oomen, Milena Niesen
Utrecht University, Netherlands

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Impressum

Herausgeber

Umweltbundesamt
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau-Roßlau
Tel: +49 340-2103-0
Fax: +49 340-2103-2285
buergerservice@uba.de
Internet: www.umweltbundesamt.de

Durchführung der Studie:

Copernicus Institute of Sustainable Development, Utrecht University
Princetonlaan 8a
3584 CB Utrecht
Niederlande

Abschlussdatum:

August 2024

Redaktion:

V 1.1 Climate Action
Leonie Bronkalla (Fachbegleitung)

Publikationen als pdf:

<http://www.umweltbundesamt.de/publikationen>

ISSN 1862-4359

Dessau-Roßlau, November 2024

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen*Autoren.

Kurzbeschreibung: Zwischen politischer Unwägbarkeit und ungewisser Forschung: Solar Radiation Modification (SRM)

Dieses Diskussionspapier untersucht Technologie-Ansätze zur Beeinflussung der Sonneneinstrahlung (Solar Radiation Modification, SRM) und ihre vielfältigen Auswirkungen. Es basiert auf den Erkenntnissen aus zwei Expert*innen-Gesprächen, die vom Umweltbundesamt und dem Copernicus Institute of Sustainable Development abgehalten wurden, und kombiniert diese mit einem Überblick über die wissenschaftliche Literatur sowie persönlichen Einschätzungen der Autor*innen. SRM umfasst verschiedene technologische Ansätze zur Abmilderung der Auswirkungen des Klimawandels durch eine Verringerung der Sonneneinstrahlung in das Klimasystem der Erde. Zu den bekanntesten Optionen gehören Stratospheric Aerosol Injection (SAI) und Marine Cloud Brightening (MCB). Während einige die SRM-Forschung angesichts der Dringlichkeit der Klimakrise als zwingend notwendig erachten, betonen andere, dass aufgrund der potenziellen technologischen, ökologischen und geopolitischen Auswirkungen von SRM Vorsicht geboten ist. Die Steuerung der SRM-Forschung stellt eine große Herausforderung dar, wobei die Meinungsverschiedenheiten oft in unterschiedlichen Weltanschauungen und Werten begründet sind. Wir unterstreichen die Bedeutung nuancierter Ansätze und plädieren für ein multilaterales Moratorium für den Einsatz von SRM, unterstützen aber auch einen strengen Rahmen zur Regulierung von Forschungsaktivitäten. Unsere Analyse unterstreicht die Notwendigkeit eines sachkundigen und umfassenden Dialogs über die Governance von SRM, bei dem wissenschaftliche Untersuchungen mit ethischen und gesellschaftlichen Erwägungen in Einklang gebracht werden.

Abstract: Solar Radiation Modification (SRM): Intractable Governance and Uncertain Science

This discussion paper provides an examination of proposed solar radiation modification (SRM) technologies and their multifaceted implications, based on insights gained from two expert workshops convened by the German Environment Agency and the Copernicus Institute of Sustainable Development, blended with an overview of the academic literature as well as personal assessments and opinions from the authors. SRM encompasses diverse methods proposed to moderate the effects of climate change by reducing solar insolation into the earth climate system, with prominent options including stratospheric aerosol injection (SAI) and marine cloud brightening (MCB). While some advocate for SRM research as imperative given the urgency of the climate crisis, others emphasize the need for caution due to potential technological, ecological, and geopolitical of SRM. The governance of SRM research poses significant challenges, with disagreements often rooted in divergent worldviews and values. We underscore the importance of nuanced approaches, advocating for a multilateral moratorium on the *use* of SRM while also supporting a stringent framework regulating research activities. Our analysis highlights the necessity of an informed and inclusive dialogue on SRM governance, balancing scientific inquiry with ethical and societal considerations.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	6
Abkürzungsverzeichnis.....	7
Zusammenfassung	8
Summary	12
1 Einleitung.....	15
2 Geoengineering in (aller) Kürze	18
3 Geoengineering: Die Technologien.....	20
3.1 Was wir über SAI (nicht) wissen	21
3.2 Was wir über MCB (nicht) wissen.....	22
3.3 Was wir über andere Technologien (nicht) wissen	23
4 Das Potenzial von SRM: Einigkeit und Kontroversen.....	25
5 Governance, Forschung und Moratorien.....	27
6 Fazit	31
7 Quellenverzeichnis.....	33
A Anhang	39
A.1 Tagesordnung des Expert*innengesprächs zur Stratosphärischen Aerosol-Injektion, 15. September 2022 (online).....	39
A.2 Tagesordnung des Expert*innengesprächs zu Solar Radiation Modification, 19. Oktober 2022 (online).....	41

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Erläuterung
CBD	Convention on Biological Diversity, Übereinkommen über die biologische Vielfalt
CCT	Cirrus cloud thinning, Ausdünnung von Zirruswolken
CDR	Carbon dioxide removal, Kohlendioxid-Entnahme aus der Atmosphäre
CERF	Civil Engineering Research Foundation, U.S.-amerikanische Stiftung für Bauingenieurwesenforschung
CO₂	Carbon dioxide, Kohlendioxid
DAC	Direct air capture, Technische Abscheidung von CO ₂ direkt aus der Umgebungsluft
GHG	Greenhouse gas, Treibhausgas
MCB	Marine cloud brightening, Aufhellung von Meereswolken
NAS	U.S. National Academic of Sciences, Engineering, and Medicine, Nationale Akademie der Wissenschaften, Ingenieurwesen und Medizin der USA
RRI	Responsible Research and Innovation, Verantwortungsbewusste Forschung und Innovation
SAI	Stratospheric aerosol injection, Stratosphärische Aerosol-Injektion
SDGs	Sustainable Development Goals, Ziele für nachhaltige Entwicklung
SRM	Solar radiation modification, solar radiation management, solar geoengineering, Modifikation der solaren Strahlung, Management solaren Strahlung, Solares Geoengineering
UNFCCC	United Nations Framework Convention on Climate Change, Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen
UV	Ultraviolett

Zusammenfassung

In diesem Diskussionspapier werden der Wissensstand zu den Technologie-Ansätzen der Solar Radiation Modification (SRM), die damit verbundenen Risiken und ihre politischen Auswirkungen untersucht. Es stützt sich auf Erkenntnisse aus zwei Expert*innengesprächen, die das UBA und das Copernicus Institute of Sustainable Development am 15. September und 19. Oktober 2022 abgehalten haben, kombiniert mit einem Überblick über die wissenschaftliche Literatur sowie persönlichen Einschätzungen der Autor*innen.

SRM (Solar Radiation Modification, auch Solar Radiation Management, Climate Intervention und Solares Geoengineering genannt) beschreibt eine Reihe von technologischen Ansätzen, die dem menschengemachten Klimawandel durch eine Verringerung der Sonneneinstrahlung in das Klimasystem der Erde entgegenwirken sollen. Indem sie die Albedo der Erde erhöhen, könnten sie die Energiemenge im Klimasystem begrenzen und so zu einer geringeren Erwärmung führen. Die Debatten über SRM-Technologien sind mannigfaltig und werden kontrovers geführt, wobei die Meinungen insbesondere über ihre Umsetzbarkeit, Risiken und ethischen Auswirkungen auseinandergehen. Während die einen für die weitere Erforschung von SRM als potenzielle klimapolitische Strategie plädieren, warnen andere aufgrund der ungewissen und potenziell schädlichen Folgen eingehend vor ihrer Entwicklung. Diese Meinungsverschiedenheiten verdeutlichen die Notwendigkeit, die mit SRM verbundenen komplexen Herausforderungen mit Bedacht zu behandeln und robuste regulatorische Rahmenbedingungen zu schaffen. In der wissenschaftlichen Literatur werden verschiedene Technologien als potenzielle SRM-Methoden behandelt, wobei die Stratospheric Aerosol Injection (SAI) und das Marine Cloud Brightening (MCB) zu den bekanntesten Optionen gehören. Ihrer bereits langjährigen Erforschung und des damit einhergehenden Potenzials zum Trotz werden sie auch stark kritisiert, u. a. im Hinblick auf ihre Wirksamkeit, die ökologischen Risiken und die geopolitischen Auswirkungen. Mögliche Wechselwirkungen zwischen SRM und den Zielen für nachhaltige Entwicklung der Vereinten Nationen (SDGs) bringen zusätzliche Komplexitäten mit sich. Während Befürworter*innen argumentieren, dass der Einsatz von SRM die negativen Auswirkungen des Klimawandels auf verschiedene SDGs abmildern könnte, bestehen Bedenken hinsichtlich der möglichen negativen Auswirkungen auf die Ernährungssicherheit, die Verfügbarkeit von Wasser, die Ökosysteme und die demokratischen Entscheidungsprozesse. Dies verdeutlicht die Notwendigkeit umfassender Forschungs- und Governance-Mechanismen zur Steuerung jener komplexen Beziehungen zwischen SRM und den SDGs.

Als der Klimawandel auf die politische Tagesordnung trat, gehörten Geoengineering-Technologien, zu denen SRM traditionell gezählt wird, zu den ersten Lösungsvorschlägen. Sie wurden jedoch zunehmend umstritten, da sie von den notwendigen Klimaschutzmaßnahmen abzulenken drohten. Mitte der 2000er Jahre lebte das Interesse wieder auf, als die Royal Society 2009 ihren Bericht zu Geoengineering veröffentlichte. Es folgten verschiedene wissenschaftliche und politische Bewertungen von Geoengineering, unter anderem durch das Umweltbundesamt (2011). Die politische und wissenschaftliche Debatte über Klimawandel und Geoengineering hat sich seitdem weiterentwickelt und unterscheidet zunehmend zwischen der Kohlendioxid-Entnahme aus der Atmosphäre (Carbon Dioxide Removal, CDR) und SRM.

SRM ist umstritten und unsicher. Es bestehen Fragen zur Wirksamkeit, zu möglichen unerwünschten Auswirkungen und zu den spezifischen Risiken, die mit den verschiedenen Technologien verbunden sind. Die *stratosphärische Aerosol-Injektion (SAI)* zielt darauf ab, das einfallende Sonnenlicht zu streuen, indem eine große Menge an Aerosolpartikeln (etwa Schwefeldioxid) in die Stratosphäre (oberhalb von etwa 20 km) eingebracht werden. Die hauptsächlich modellgestützte Forschung zu SAI lässt Zweifel an der Zuverlässigkeit der

Prognosen aufkommen, insbesondere was die Auswirkungen auf globaler und regionaler Ebene betrifft. Es gilt zwar als gesichert, dass SAI zu einer Verringerung der globalen Temperaturen führen würde, doch verbleiben weiterhin Unsicherheiten hinsichtlich des Ausmaßes dieser Abkühlung und der weiterreichenden Auswirkungen auf verschiedene Klimasysteme. Potenzielle negative klimatologische Auswirkungen bieten einen zentrale Anlass zur Sorge, einschließlich Veränderungen der Niederschlags- und Sturmmuster sowie der Kohlenstoffaufnahme, die regionale Schwankungen und vorübergehende, auf die Tageslichtseite des Planeten begrenzte Auswirkungen aufweisen könnten. Eine weitere kritische Ungewissheit betrifft den potenziellen Abbau des stratosphärischen Ozons aufgrund erhöhter Aerosolwerte, was zu einer erhöhten UV-Strahlung an der Erdoberfläche führen könnte. Weitere Unwägbarkeiten betreffen die möglichen Auswirkungen von SAI auf die landwirtschaftliche Produktivität und ökologische Systeme. Nach wie vor gibt es Fragen zu den sicheren und wirksamen technische Umsetzung von SAI, einschließlich Überlegungen zu Aerosoltypen und der Methode des Eintrags in die Stratosphäre. Diese Ungewissheiten stellen nicht nur eine wissenschaftliche Herausforderung dar, sondern haben auch erhebliche politische Auswirkungen, die zu geopolitischen Spannungen führen können.

Marine Cloud Brightening (MCB) zielt darauf ab, die Erde zu kühlen, indem das Reflexionsvermögen tief hängender Wolken über Teilen des Ozeans erhöht wird. Dazu werden mehr Partikel in die Wolken eingebracht, um mehr Kerne zu erzeugen, um die sich Tröpfchen bilden können, wodurch ihr Reflexionsvermögen erhöht wird. Es bestehen jedoch erhebliche Unsicherheiten in Bezug auf die Wirkung von MCB, einschließlich des Abkühlungspotenzials und der Wechselwirkung mit Wolken, Aerosolen und Niederschlagsmustern. Die Forschungsarbeit zu MCB ist meist modellbasiert, jedoch bestehen Unstimmigkeiten zwischen den Modellen und mit Beobachtungsdaten hinsichtlich der Wechselwirkungen zwischen Aerosolen und Wolken. Dies lässt Zweifel an der Zuverlässigkeit der Modellprojektionen für die Wirksamkeit und die Risiken von MCB aufkommen. Darüber hinaus ist die technische Umsetzung von MCB noch unzureichend, und seine potenziellen Auswirkungen auf marine Ökosysteme sind ungewiss. Es stellt sich die Frage, wie MCB-Forschungsprojekte einzurichten und zu überwachen sind und wann sie im Falle negativer Auswirkungen zu stoppen sind.

Die meisten anderen technologischen Ansätze werden aufgrund der wirtschaftlichen Kosten, der technischen Unsicherheiten, der prognostizierten Wirksamkeit und der potenziellen Risiken als unrentabel für eine erfolgreiche Abkühlung des Klimas angesehen. Dazu gehören Weltraumspiegel, die Aufhellung von Infrastrukturen, die gentechnische Veränderung von Pflanzen zur Verbesserung der Albedo und die Verwendung von Mondstaub zur Abschirmung der Erde vor Sonnenlicht. Eine Alternative mit Potenzial, wenn auch nur regional, ist das Cirrus Cloud Thinning (CCT). Bei CCT werden die Zirruswolken in der oberen Troposphäre ausgedünnt, damit mehr langwellige Strahlung entweichen kann, was zu einer Abkühlung des Klimas führen könnte. CCT ist jedoch kaum bekannt, und seine Wirksamkeit und Durchführbarkeit sind ungewiss. Sie bietet zwar Vorteile gegenüber MCB und SAI, da sie mehr langwellige Strahlung entweichen lässt, birgt aber auch Risiken und Unsicherheiten in Bezug auf die Auswirkungen auf regionale Niederschläge, das genaue Kühlungspotenzial und die Durchführbarkeit. Die Forscher vermuten, dass die CCT, wenn sie erfolgreich ist, möglicherweise nur zur Kühlung der antarktischen Regionen beiträgt und keine globale Kühlung bewirkt. Insgesamt bestehen nach wie vor erhebliche Unsicherheiten in Bezug auf die Wirksamkeit, die Durchführbarkeit und die potenziellen Auswirkungen von CCT.

Die Governance, Erforschung und potenzielle Umsetzung von SRM stellen komplexe Herausforderungen dar, die mit geopolitischen sowie Aspekten der Gerechtigkeit verwoben sind. Grundlegende Meinungsverschiedenheiten bestehen weiterhin hinsichtlich der Rolle von

SRM in der Klimapolitik, wobei sich in einigen Punkten ein Konsens abzeichnet: SRM kann die Bemühungen um eine rasche Dekarbonisierung nicht ersetzen, es kann die Erwärmung vorübergehend verschleiern, ohne jedoch die Ursache zu bekämpfen, und SRM-Technologien für die globale Kühlung sind höchst unsicher und riskant. Zu den Bedenken hinsichtlich der Governance gehören die potenzielle Ablenkung von Treibhausgasminderung, die Festlegung auf SRM-Technologien im Sinne eines Lock-in-Effekts, militärische und sicherheitsrelevante Effekte, Herausforderungen für die demokratische Entscheidungsfindung und die globale Gerechtigkeit bei der Umsetzung und Wissensproduktion. Als Reaktion darauf plädieren viele Wissenschaftler*innen und Governance-Forscher*innen für ein internationales Abkommen über die Nichtnutzung von SRM, um deren Entwicklung, Freilandversuche und Einsatz zu verbieten. Viele sind sich über die Dringlichkeit eines Moratoriums für den *Einsatz* von SRM einig. Uneinigkeit herrscht jedoch über die in dem Abkommen vorgeschlagenen strengen Vorschriften und die teilweise Streichung von Mitteln für die Forschung und Entwicklung von SRM. Dies spiegelte sich auch in den beiden vom UBA einberufenen SRM-Expertenworkshops wider, in denen Wissenschaftler*innen auf den erheblichen Wissensmangel hinwiesen, der zu eklatanten Unsicherheiten über die Wirksamkeit, Risiken und Kosten von SRM führt. Einige der Wissenschaftler*innen sahen darin einen wichtigen Grund für mehr (auch staatlich finanzierte) Forschung und äußerten auch die Hoffnung, dass dadurch SRM als einfache Lösung für den Klimawandel entkräftet werden könnte. Die meisten Expert*innen waren sich einig, dass ein Abkommen über die Nichtnutzung und eine strengere Kontrolle der Forschung erforderlich sind. Die öffentliche Finanzierung wurde als entscheidend für die Transparenz erachtet, auch wenn weiterhin Bedenken hinsichtlich der Normalisierung und Entwicklung von SRM bestehen. Insgesamt unterstrichen die beiden SRM-Workshops die Notwendigkeit einer soliden Governance, Transparenz und demokratischer Prozesse in der SRM-Forschung und der potenziellen Umsetzung.

Die heute getroffenen Entscheidungen in der SRM-Governance werden diese in den kommenden Jahren prägen, was die Verflechtung von Forschung, Governance und gegenwärtigen politischen Dynamiken verdeutlicht. Insgesamt besteht Konsens darüber, dass internationale Zusammenarbeit und Steuerungsmechanismen erforderlich sind, um die mit SRM verbundenen geophysikalischen, ökologischen und politischen Risiken zu bewältigen. Es ist weithin anerkannt, dass SRM niemals ein Allheilmittel für den Klimawandel sein kann und die Bemühungen zur Treibhausgasreduktion nicht ersetzen sollte und kann.

Die Frage, ob SRM als Schutzmaßnahme gegen die schwerwiegendsten Auswirkungen des Klimawandels dienen kann, ist nach wie vor umstritten. Daher schlagen wir vor:

- ▶ Verfolgung eines multilateralen Moratoriums für den Einsatz von SRM oder alternativ Bildung einer Koalition von Parteien, die bereit sind, auf den Einsatz von SRM zu verzichten.
- ▶ Schaffung eines strengen Rahmens für die SRM-Forschung, der von Forscher*innen mit unterschiedlichem disziplinärem Hintergrund gemeinsam entwickelt wird. Dieser Rahmen sollte sich mit dem Zweck, dem Umfang, der Finanzierung, der Transparenz und den partizipativen Prozessen der SRM-Forschung befassen, wobei der Schwerpunkt auf politischen und gesellschaftlichen Risiken liegen sollte. Der Selbstverwaltung innerhalb der Forschungsgemeinschaft sollte entgegengewirkt werden.
- ▶ Verweigerung der Unterstützung für die Entwicklung von SRM-Technologien, wenn die Forschung nicht strenger kontrolliert wird, insbesondere im Hinblick auf öffentliche Konsultationen und die Vielfalt der Perspektiven und Wissensformen.

Wesentlichen plädieren wir dringend für die Verabschiedung eines Nichtnutzungs-Abkommens zu SRM, das sich an den im CBD-Beschluss X/33 dargelegten Grundsätzen orientiert. Die Vorzüge und Grenzen der bestehenden Vorschläge für ein solches Abkommen müssen sowohl in der Politik als auch in der Wissenschaft weiter diskutiert werden.

Summary

This discussion paper explores the level of knowledge on proposed solar radiation modification (SRM) technologies, their associated risks as well as their governance implications. It draws upon insights from two expert workshops convened by the UBA and the Copernicus Institute of Sustainable Development on 15 September and 19 October 2022, blended with an overview of the academic literature as well as personal assessments from the authors.

SRM (also referred to as solar radiation management, climate intervention, and solar geoengineering) describes a set of proposed technologies that aim to counteract anthropogenic climate change through reducing solar insolation into the earth climate system. Aiming to enhance the earth's albedo, they could limit the amount of energy in the climate system, hence leading to less warming. Debates surrounding SRM technologies are multifaceted and contentious, with divergent viewpoints on their feasibility, risks, and ethical implications. While some advocate for further research into SRM as a potential climate intervention strategy, others caution against its development due to the uncertain and potentially harmful consequences. These disagreements underscore the need for cautious consideration and robust governance frameworks to address the complex challenges associated with SRM. Within the academic literature, various technologies appear as potential SRM methods, with stratospheric aerosol injection (SAI) and marine cloud brightening (MCB) among the most prominent options. These technologies have been extensively studied, reflecting their perceived scientific promise. However, they also face significant criticism, including concerns about their effectiveness, ecological risks, and geopolitical implications. Possible interactions between SRM and the United Nations Sustainable Development Goals (SDGs) introduce additional complexities. While proponents argue that SRM deployment could mitigate the adverse effects of climate change on various SDGs, concerns persist regarding its potential negative impacts on food security, water availability, ecosystems, and democratic governance. These complexities underscore the necessity of comprehensive research and governance mechanisms to navigate the intricate relationships between SRM and the SDGs.

Geoengineering technologies, under which SRM has traditionally been grouped, were among the first proposals when climate change entered the political agenda. However, they became controversial as potential distractions from necessary mitigation commitments. Interest resurged in the mid-2000s, associated with the Royal Society's publication of its 2009 report and followed by various scientific and policy assessments on Geoengineering have followed, including by the Umweltbundesamt (2011). The political and scientific debate surrounding climate change and geoengineering has since evolved to increasingly differentiate between Carbon Dioxide Removal (CDR) and SRM.

SRM is controversial and uncertain, with questions about its efficacy, potential unwanted effects, and specific risks associated with different technologies. *Stratospheric aerosol injection (SAI)* aims at scattering incoming sunlight by increasing the amount of aerosol particles (such as sulfur dioxide) in the stratosphere (above about 20 km). The primarily model-based research leaves doubts about the reliability of projections, particularly concerning of the effects at both global and regional scales. While there is general agreement that SAI would lead to a reduction in global temperatures, uncertainties persist concerning the magnitude of this cooling effect and the broader impacts on various climate systems. Potential adverse climatological effects are a key concern, including alterations in precipitation and storm patterns as well as carbon uptake, which may exhibit regional variability and transient impacts limited to the daylight side of the planet. Another critical uncertainty pertains to the potential depletion of stratospheric ozone due to increased aerosol levels, which could result in heightened UV radiation at the Earth's

surface. Additional uncertainties surround the potential impact of SAI on agricultural productivity, and ecological systems. Questions persist regarding the safest and most effective methods for implementing SAI, including considerations of aerosol types and strategies for distributing them in the stratosphere. These uncertainties not only pose scientific challenges but also have significant political implications, potentially leading to geopolitical tensions.

Marine Cloud Brightening (MCB) aims to cool the Earth by increasing the reflectivity of low-hanging clouds over parts of the ocean. This involves introducing more particles into clouds to create more nuclei around which droplets can form, thereby increasing their reflectivity. However, there are significant uncertainties regarding MCB's potential effects, including its cooling potential and interaction with clouds, aerosols, and precipitation patterns. Most research on MCB is model-based, but there are inconsistencies among models and with observational data regarding aerosol-cloud interactions. This raises doubts about the reliability of model projections for MCB's effectiveness and risks. Additionally, the technical implementation of MCB is still lacking, and its potential impacts on marine ecosystems are uncertain. Questions remain about how to set up and monitor MCB research projects and when to halt them if adverse effects arise.

Most other proposed technologies are considered unviable for providing global cooling due to economic costs, technical uncertainties, projected efficacy, and potential risks. These include space mirrors, whitening of infrastructures, genetically modifying plants for albedo enhancements, and using moon dust to shield the Earth from sunlight. One alternative with potential, albeit only regionally, is *Cirrus Cloud Thinning (CCT)*. CCT involves thinning cirrus clouds in the upper troposphere to allow more longwave radiation to escape, thereby potentially cooling the climate. However, CCT is poorly understood, and its effectiveness and feasibility are uncertain. While it may offer advantages over MCB and SAI in allowing more longwave radiation to escape, it also carries risks and uncertainties regarding its impact on regional precipitation, exact cooling potential, and feasibility. Researchers suggest that if successful, CCT may only be effective in cooling Antarctic regions rather than achieving global cooling.

The governance, research, and potential implementation of Solar Radiation Management (SRM) present complex challenges, intertwined with geopolitical and justice concerns. Fundamental disagreements persist regarding SRM's role in climate policy, with consensus emerging on several points: SRM cannot replace rapid decarbonization efforts, it may temporarily mask warming but fails to address its root cause, and SRM technologies for global cooling are highly uncertain and risky. Governance concerns include the potential deterrence from mitigation policies, locking in SRM technologies, military and securitization effects, challenges to democratic decision-making, and global justice in implementation and knowledge production. In response, many scientists and governance scholars advocate for an international non-use agreement on SRM, aiming to prohibit its development, outdoor experiments and deployment. Many agree on the urgency of a moratorium on SRM use. However, disagreements persist regarding the strict regulations and partial defunding of SRM research and development proposed in the agreement. This was reflected in the two SRM expert workshops convened by the UBA, in which scientists referred to the vital reason for more (including state-funded) research and also expressed the hope that this could help invalidate SRM as a simplistic solution to climate change. Most experts agreed on the need for a non-use agreement and stricter research governance. Public funding was deemed crucial for transparency, although concerns remain about the normalization and implementation of SRM. Overall, the two SRM workshops underscored the need for robust governance, transparency, and democratic processes in SRM research and potential deployment.

Decisions made today will shape the governance of SRM for years to come, illustrating the entanglement of research, policy, and political dynamics. Overall, there is consensus on the need for international cooperation and governance mechanisms to address the geophysical, ecological, and political risks associated with SRM. It is widely acknowledged that SRM cannot serve as a panacea for climate change and should not replace mitigation efforts.

Whether it could act as a safeguard against the most severe impacts of climate change remains a contentious topic. Consequently, we propose:

- ▶ Pursuing a multilateral moratorium on SRM implementation, or alternatively, forming a coalition of willing parties to abstain from its use.
- ▶ Establishing a rigorous framework for SRM research, developed collaboratively by researchers from diverse backgrounds. This framework should address the intent, scale, funding, transparency, and participatory processes of SRM research, with a focus on political and societal risks. Self-governance within the research community should be discouraged.
- ▶ Withholding support for further development of SRM technologies in the absence of stricter research governance, particularly regarding public consultation and diversity of perspectives.

Providing incentives and resources for researchers to engage in developing comprehensive governance frameworks in partnership with funding agencies. In essence, we advocate for an urgent adoption of a non-use agreement on SRM, drawing from the principles outlined in the CBD Dec. X/33. The merits and limitations of existing proposals for such an agreement warrant continued debate, both within political and academic spheres.

1 Einleitung

In den Expert*innengesprächen, die am 15. September und 19. Oktober 2022 seitens des Umweltbundesamts (UBA) in Zusammenarbeit mit dem Copernicus Institute of Sustainable Development der Universität Utrecht durchgeführt wurden, wurden die wissenschaftliche, technologische sowie die geopolitische Umsetzbarkeit und Erwünschtheit verschiedener SRM-Technologien diskutiert. Dieses Diskussionspapier bietet einen umfassenden Überblick über die wissenschaftliche Literatur zu diesen Technologien sowie über die in den Expert*innengesprächen geäußerten Positionen, ergänzt durch die persönlichen Einschätzungen und Meinungen der Autor*innen. Sofern nicht anders angegeben, basieren die in diesem Papier präsentierten Erkenntnisse auf Bewertungsgutachten und wissenschaftlicher Literatur. Positionen, die durch die Autor*innen bezogen oder als direkte Ableitungen aus den Gesprächen dargestellt werden, sind entsprechend gekennzeichnet.

Der Begriff Solar Radiation Modification (SRM), auch bekannt als Solar Radiation Management, Climate Intervention oder Solares Geoengineering, beschreibt eine Reihe von technologischen Ansätzen, die darauf abzielen, dem menschengemachten Klimawandel durch die Reduzierung der Sonneneinstrahlung in das Klimasystem der Erde entgegenzuwirken. SRM-Technologien werden auch als Albedo-Modifikationstechnologien bezeichnet, da sie die diffuse Reflexion von Sonnenstrahlung (Albedo) erhöhen sollen. Durch diese Maßnahmen würde die im Klimasystem vorhandene Energiemenge begrenzt und somit die Erwärmung verringert. In der wissenschaftlichen Literatur werden verschiedene Technologien als potenzielle SRM-Methoden diskutiert, die von der Erhöhung der Reflektivität von Ozeanoberflächen durch sog. „Microbubbles“ bis hin zur Injektion von Aerosolen in die Stratosphäre reichen, um einfallendes Sonnenlicht zu streuen und zu reflektieren. Die Idee von SRM entstand bereits in den 1960er Jahren und erfuhr in den 2000er Jahren zunehmendes Interesse, was sich in einer wachsenden Zahl wissenschaftlicher Studien und solchen zur politischen Beratung zu diesen Technologien widerspiegelt. Angesichts der streitbaren Einschätzung, dass das Erreichen der 1,5°- und 2°-Ziele zunehmend außer Reichweite gerät, erachten einige Atmosphärenwissenschaftler*innen die SRM-Forschung als dringend notwendig. In dieser Sichtweise könnte SRM das ‚Überschreiten‘ der Kohlendioxidkonzentrationen vorübergehend maskieren, während Maßnahmen zur Entnahme von Kohlendioxid aus der Atmosphäre (Carbon Dioxide Removal, CDR) diese Konzentrationen wieder auf sichere Werte zurückführen und somit als Versicherung gegen katastrophale Erwärmung dienen (Irvine et al. 2019; Wagner 2021).

Zahlreiche andere Forscher*innen kritisieren SRM-Ansätze aus verschiedenen Gründen, unter anderem, weil diese Technologien nicht auf die eigentliche Ursache des Klimawandels wirken (Hulme 2014; Lovelock 2008), mit einer gerechten und demokratischen Regierungsführung unvereinbar sind (Biermann et al. 2022; Szerszynski et al. 2013), ernsthafte geopolitische und sicherheitspolitische Probleme aufwerfen (Chalecki/Ferrari 2018; Heyen/Horton/Moreno-Cruz 2019; McLaren/Corry 2021a, b), erhebliche ökologische Risiken mit sich bringen (McDonald 2022; Trisos et al. 2018a) und vor allem eine potenziell gefährliche Verzögerung bei der Reduzierung von Emissionen herbeiführen könnten (McLaren 2016; Tsipiras/Grant 2022). Angesichts der aktuellen geopolitischen Unsicherheiten und der anhaltenden Herausforderungen in der Klimapolitik handelt es sich um eine Debatte, die wahrscheinlich nicht gelöst werden kann.

Die prominentesten Optionen dieser technologischen Konzepte sind die stratosphärische Aerosol-Injektion (SAI) und die Aufhellung von Meereswolken (Marine Cloud Brightening, MCB). SAI zielt darauf ab, das einfallende Sonnenlicht durch die Erhöhung der Aerosolkonzentration in der Stratosphäre (etwas über 20 km Höhe) zu streuen. MCB zielt darauf ab, die Erde durch die

Aufhellung der Reflektivität der niedrig hängenden und beständigen Wolkendecke über Teilen des Ozeans zu kühlen. Eine weitere zur wissenschaftlichen Diskussion stehende Technologie ist die Verdünnung von Zirruswolken (Cirrus Cloud Thinning, CCT), die darauf abzielt, die Menge der langwelligeren Strahlung, die die Atmosphäre verlässt, zu erhöhen, indem dünne, schleierartige Wolken in der oberen Troposphäre ausgedünnt werden. Zudem gibt es verschiedene Überlegungen zur Modifikation der Oberflächenalbedo des Ozeans, um die Reflektivität von Ozeanoberflächen zu erhöhen, sowie zu Weltraumschilden (oder Spiegeln) und zur Erhöhung der Landoberflächenalbedo, insbesondere in Wüstenregionen. Im jüngsten Bewertungsbericht der National Academies of the Sciences werden beispielsweise nur SAI, MCB und CCT ausführlich behandelt (National Academies of Sciences 2021). Dies bedeutet zwar nicht, dass andere SRM-Methoden zwangsläufig unbrauchbar sind, deutet jedoch auf einen aufkommenden wissenschaftlichen Konsens hin, der SAI und MCB als die wissenschaftlich vielversprechendsten Ansätze betrachtet. Für die globale Abkühlung scheint CCT weniger vielversprechend oder sogar kontraproduktiv zu sein (Gasparini et al. 2020; Gasparini/Lohmann 2016; Lohmann/Gasparini 2017).

Vorschläge für SRM-Technologien und deren Erforschung haben zu stark polarisierten und kontroversen Debatten geführt, die sich stetig weiterentwickeln. Anfangs konzentrierte sich die Forschung hauptsächlich auf die Bewertung der Machbarkeit von SRM-Technologien. Zunehmend fordern Forscher*innen jedoch auch eine Forschung zur Entwicklung von SRM, mit dem Argument, dass diese Forschung angesichts absehbarer extremer Klimaveränderungen unerlässlich sei. Wir betrachten diese Entwicklungen mit Besorgnis, und vertreten die Position, dass die Erforschung dieser Technologien keineswegs ohne Weiteres erstrebenswert ist. Alle technologischen Ansätze bergen ernsthafte und weitgehend unvorhersehbare technologische, ökologische und geopolitische Risiken. Aufgrund der drohenden Ablenkung von notwendigen Emissionsreduktionen, und des Risikos eines Terminationsschocks könnte SRM die Klimakrise sogar verschärfen. Es besteht erhebliche wissenschaftliche Uneinigkeit über das Ausmaß dieser Risiken, darüber, wie solche Risiken im Vergleich zu solchen des Klimawandels zu bewerten sind, und ob solche Unsicherheiten jemals gelöst werden können (Oomen, 2021; NAS, 2021). Diese Uneinigheiten resultieren oftmals aus unterschiedlichen Sichtweisen auf das Abwägen relativer Risiken und Nutzen, verschiedenen Interpretationen der gegenwärtigen politischen Lage und divergierenden Weltanschauungen und Werten (Oomen 2021). Sie stellen daher einen weitgehend unlösbaren Konflikt zwischen verschiedenen Werten und Weltanschauungen dar. Es ist unwahrscheinlich, dass diese Uneinigkeiten, die auch vermeintlich neutrale wissenschaftliche Fragenstellungen zur Modellvalidität und den unmittelbaren Auswirkungen von SRM einschließen, jemals vollständig aufgelöst werden. Dies ist sowohl auf die grundlegende Unsicherheit komplexer Klimasysteme als auch auf divergierende Meinungen über eine gute wissenschaftliche Praxis zurückzuführen. Aus diesen Gründen fordert eine wachsende Gruppe von Forscher*innen Einschränkungen und Verbote der Entwicklung von SRM-Technologien (z. B. Biermann, 2021; Biermann et al., 2022; Stephens et al., 2021; Surprise, 2022). Mindestens jedoch sind diese unlösbaren Konflikte ein zwingender Grund, mit äußerster Vorsicht und im Sinne des Vorsorgeprinzips vorzugehen und dem einfachen Narrativ zu widerstehen, dass mehr wissenschaftliche Forschung immer vorzuziehen sei.

Zudem bestehen erhebliche Unsicherheiten und Wissenslücken hinsichtlich der Wechselwirkungen mit den politisch vereinbarten Zielen für nachhaltige Entwicklung (SDGs). Einerseits argumentieren Befürworter*innen von SRM, dass ein potenzieller Einsatz negative Auswirkungen auf alle SDGs, die vom Fortschreiten des Klimawandels betroffen sind, wie SDGs 1, 2, 3, 14 und 15, mildern könnte. Andererseits weisen viele der oben beschriebenen potenziell nachteiligen Auswirkungen von SAI ebenso auf klare negative Auswirkungen auf die SDGs hin. Besonders hervorzuheben sind Veränderungen lokaler Klimaparameter wie dem Niederschlag,

die die Ernährungssicherheit (SDG 2), die Wasserverfügbarkeit (SDG 6) oder die Sicherheit von menschlichen Siedlungen (SDG 11) beeinträchtigen könnten (Honegger et al. 2018; Barnes et al. 2019). Potenzielle Versauerungseffekte auf Oberflächenwasser und Böden könnten empfindliche Ökosysteme stören (SDGs 14, 15) (Honegger et al. 2018; Honegger/Michaelowa/Pan 2021; Vioni et al. 2018). Die beschriebenen Governance-Herausforderungen spiegeln sich wiederum in komplexen Wechselwirkungen mit den SDGs wider, etwa bei potenziellen Sicherheitsrisiken (SDG 16) und Fragen der Repräsentation und demokratischen Governance (SDGs 1, 10). Die Unterrepräsentation von Frauen in der SRM-Forschung wurde als Wissenslücke in Bezug auf Geschlechterungleichgewichte bei Governance-Überlegungen hervorgehoben (SDG 5) (Buck/Gammon/Preston 2014; Honegger/Michaelowa/Pan 2021). Schließlich wirkt sich das Risiko einer Ablenkung von der Emissionsreduktion negativ auf SDG 13 aus, das sich auf dringende Maßnahmen zur Bekämpfung des Klimawandels konzentriert.

2 Geoengineering in (aller) Kürze

Der Begriff Geoengineering umfasst eine Vielzahl unterschiedlicher Technologien und Interventionen und bezeichnet historisch eine breite Palette groß angelegter Eingriffe in die Umwelt der Erde. Dieser Begriff wird sowohl im Kontext des menschengemachten Klimawandels (z.B. National Academies of Sciences, 2021; National Academy of the Sciences, 1992; Royal Society, 2009; Umweltbundesamt, 2011) als auch im Bereich der Eingriffe in die Lithosphäre, also die äußersten Schichten des Erdkörpers (z.B. Civil Engineering Research Foundation [CERF], 1994; Morgenstern, 2000; National Research Council, 2006, S. 1), verwendet und findet gelegentlich auch in der Ökologie Anwendung, etwa im Zusammenhang mit der Behandlung hypoxischer Toter Zonen in Meeren und Seen (Lüring et al. 2016; Stigebrandt et al. 2015). Obwohl diese Interventionen eine familiäre Ähnlichkeit in Bezug auf ihre Grundgedanken und Zielsetzung teilen (Oomen/Meiske 2021), ist Geoengineering in der öffentlichen Wahrnehmung zunehmend mit „Klima-(Geo)engineering“ gleichbedeutend geworden. Das wissenschaftliche und politische Interesse am Geoengineering geht der „Klimawissenschaft“ als Disziplin voraus und ist so alt wie die wissenschaftliche Erkenntnis des Zusammenhangs zwischen Kohlendioxidkonzentrationen und globaler Temperatur (Baskin 2019; Fleming 2010; Oomen 2021). Im Zusammenhang mit dem Klimawandel gehörten Geoengineering-Technologien zu den ersten Vorschlägen, als das Thema auf die politische Agenda gelangte (The White House 1965). In den 1980er und 1990er Jahren, als der Klimawandel zu einem bedeutenden politischen Thema wurde, galten Geoengineering-Technologien jedoch als umstritten. Sowohl Wissenschaftler*innen als auch Politiker*innen betrachteten solche Technologien als gefährliche Ablenkung von notwendigen konventionellen Verpflichtungen zur Emissionsreduktion, wenngleich „Geoengineering“ in einem prominenten Bericht der National Academy of Sciences von 1992 über den Klimawandel Erwähnung fand. Das Interesse am Geoengineering blieb daher bis Mitte der 2000er Jahre marginal, bevor es durch den Bericht der Royal Society von 2009 wiederbelebt wurde, der sowohl Methoden zur Kohlendioxidentnahme (Carbon Dioxide Removal, CDR) als auch zum Solar Radiation Management (SRM) umfasste. Seitdem wird der Begriff „Geoengineering“ zunehmend im Sinne der Definition der Royal Society von 2009 verwendet, als „bewusster, groß angelegter Eingriff in das Klimasystem der Erde, um die globale Erwärmung zu begrenzen“ (Royal Society, 2009: ix, Anm.: Übersetzung der Autor*innen). Im Jahr 2011 veröffentlichte das Umweltbundesamt (UBA) ein eigenes Positionspapier zum Geoengineering, das hier ebenfalls als breite technologische Kategorie definiert wurde (Umweltbundesamt, 2011). Eine Reihe wissenschaftlicher und politischer Bewertungen sowie Verpflichtungen zu SRM folgte (z.B. National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2021; National Research Council, 2015; United Nations Environment Programme, 2023; Williamson & Bodle, 2016). Zuletzt veröffentlichten die Europäische Kommission und der Hohe Vertreter der Europäischen Union für Außen- und Sicherheitspolitik eine gemeinsame Mitteilung, in der sie erklärten, dass die EU „internationale Bemühungen unterstützen wird, die Risiken und Unsicherheiten von Klimainterventionen, einschließlich der Modifikation der solaren Strahlung, umfassend zu bewerten“ (Europäische Kommission/Hohen Vertreter der Union für Außen- und Sicherheitspolitik 2023, S. 20, Anm.: Übersetzung der Autor*innen). Im Juni 2023 veröffentlichte das Weiße Haus einen Bericht, der einen vom U.S.-amerikanischen Kongress vorgeschriebenen Forschungsplan mit Schwerpunkt auf atmosphärischen SRM-Methoden (insbesondere Stratospheric Aerosol Injection, SAI, und Marine Cloud Brightening, MCB) enthielt. Der Bericht stellt ausdrücklich keine politische Entscheidung der Exekutive der Biden-Administration dar, sondern entwickelt theoretische Leitlinien für transparente und gerechte SRM-Forschung sowie Ansätze für nationale und internationale Koordination (OSTP 2023).

Seit 2011 hat sich die politische und wissenschaftliche Debatte um den Klimawandel und Geoengineering stark verändert – obwohl viele der ursprünglichen Unsicherheiten bestehen bleiben. Zum einen haben sich CDR und SRM zunehmend differenziert und werden vermehrt isoliert voneinander betrachtet. Infolgedessen wird der Begriff „Geoengineering“ seltener verwendet, insbesondere im Zusammenhang mit CDR. Das vorliegende Diskussionspapier nimmt diese Differenzierung zur Kenntnis, erkennt aber auch die unvermeidliche Unvollkommenheit als auch die Notwendigkeit der Klassifizierung von Geoengineering an. Dieses erste Papier behandelt SRM als technologische Kategorie. Das zweite Diskussionspapier wird sich mit landbasierten (terrestrischen) CDR und Direct Air Capture (DAC) befassen. Das dritte Papier in der Serie konzentriert sich auf marine Formen der Kohlendioxidentfernung.

3 Geoengineering: Die Technologien

Die Bewertung der U.S. National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine (NAS) wies im letzten Jahr darauf hin, dass SRM-Technologien möglicherweise eine zusätzliche Strategie zur Reaktion auf den Klimawandel darstellen könnten – obwohl dies hochgradig unsicher ist. Zugleich könne SRM niemals ein Ersatz für die Reduzierung von Treibhausgasemissionen (THG) sein: „Dies liegt zum Teil daran, dass [SRM]

- ▶ nicht auf die zugrunde liegende Ursache des Klimawandels (steigende THG-Konzentrationen in der Atmosphäre) oder die wesentlichen Auswirkungen des steigenden atmosphärischen CO₂, wie die Versauerung der Ozeane, wirkt;
- ▶ Bedenken hinsichtlich neuer Risiken, Unsicherheiten und unbeabsichtigter Auswirkungen auf natürliche Ökosysteme, die Landwirtschaft, die menschliche Gesundheit und andere kritische gesellschaftliche Bereiche aufwirft;
- ▶ kein zuverlässiges Mittel bieten kann, um das globale oder regionale Klima auf einen gewünschten früheren Zustand zurückzuführen; und
- ▶ untragbare Risiken eines katastrophal schnellen Erwärmungsprozesses mit sich brächte, wenn die Intervention einmal beendet würde (falls sie verwendet worden wäre, um eine große Menge an Erwärmung auszugleichen, ohne gleichzeitig Maßnahmen zur Reduzierung der THG-Emissionen zu ergreifen)“ (National Academies of Sciences, 2021: S. 2-4, Anm.: Übersetzung der Autor*innen).

SRM ist sowohl umstritten als auch mit erheblichen Unsicherheiten behaftet. In technologischer und klimatologischer Hinsicht bestehen Fragen zur Wirksamkeit von SRM im großen Maßstab sowie zu potenziell unerwünschten Effekten. Diese Fragen betreffen SRM als breit gefasste Kategorie und umfassen Bedenken hinsichtlich der Veränderung von Niederschlagsmustern oder der Zuordnung von Effekten zu spezifischen SRM-Interventionen. Spezifische Technologien bringen wiederum spezifische Risiken und Unsicherheiten mit sich. So umfassen die Risiken bei SAI beispielsweise Auswirkungen auf Wasserkreisläufe (Cheng et al. 2019; Tilmes et al. 2013) und auf die stratosphärische Ozonschicht (Tilmes et al. 2021, 2022) sowie regionale und saisonale Effekte (Abiodun et al. 2021; Krishnamohan/Bala 2022; Vioni et al. 2020). Darüber hinaus bestehen Bedenken hinsichtlich der Wissensproduktion. Die Zuverlässigkeit und Validität modellbasierter Prognosen wird einerseits intensiv diskutiert (Fasullo/Richter 2022), Feldexperimente andererseits sind stark umstritten (Mettiäinen et al. 2022). Schließlich werfen soziale und politische Bedenken in Bezug auf SAI die Frage auf, ob SAI auf gerechte und demokratische Weise reguliert werden könnte (Grieger et al. 2019; McLaren/Corry 2021a).

Erkenntnisse aus den SRM-Expert*innengesprächen

Die Expert*innengespräche haben deutlich gemacht, dass innerhalb der Forschungsgemeinschaft erhebliche Uneinigkeit darüber besteht, in welchem Maß diese Risiken auf spezifische Technologien zutreffen und ob diese Unsicherheiten aufgelöst werden könnten. Die anwesenden Expert*innen waren sich jedoch einig, dass sie mit einem erheblichen „Mangel an Wissen“ operieren. Der Forschungsstand ist so rudimentär, dass es äußerst schwierig ist, definitive Aussagen über die Wirksamkeit verschiedener SRM-Methoden, die Risiken dieser Methoden, die technische Umsetzbarkeit der Umsetzung solcher Maßnahmen und ihre potenziellen Kosten der Implementierung zu treffen. Gleichzeitig ist sich die Expert*innengemeinschaft uneinig darüber, inwieweit weitere Forschung die Risikobewertung verbessern und ob verbleibende Risiken auf akzeptable Niveaus reduziert werden könnten. Darüber hinaus könnten viele grundlegende

Fragen, sowohl geophysikalische und bioökologische als auch geopolitische, erst durch eine Umsetzung in großem Maßstab gelöst werden (bekannte Unbekannte). Eine weitere zentrale Beobachtung aus den Expert*innengesprächen ist, dass eine genaue Forschung das angenommene, vermeintlich große Ausmaß, in dem SRM im Kampf gegen die globale Erwärmung nützlich sein könnte, oftmals auf weitaus bescheidenere Proportionen reduziert. Für die meisten Wissenschaftler*innen, die an den Gesprächen teilnahmen, beantwortet eine empirische SRM-Forschung die Fragen nach dem, „was nicht zu tun ist“ und „können SRM-Methoden überhaupt funktionieren?“, neben Fragen zur Entwicklung und zum Einsatz von SRM.

3.1 Was wir über SAI (nicht) wissen

Nahezu die gesamte klimatologische Forschung zu SAI stützen sich auf Modelle, die mittels Modellprojektionen die potenziellen Auswirkungen bewerten sollen. Es bestehen erhebliche Unsicherheiten hinsichtlich der potenziellen Auswirkungen von SAI, einschließlich ihres Kühlungspotenzials. Obwohl ein weitgehender Konsens darüber besteht, dass SAI die globalen durchschnittlichen Oberflächentemperaturen senken könnte, „bleiben große Unsicherheiten hinsichtlich des Kühlungspotenzials in Abhängigkeit von der Menge, dem Einbringungsort und der Art der Injektion sowie hinsichtlich der Auswirkungen einer erhöhten Aerosolbelastung auf die Atmosphärenchemie, den Transport und die daraus resultierenden regionalen und lokalen Klimaeffekte; diese tragen zur Unsicherheit in der Klimareaktion und den daraus resultierenden globalen Auswirkungen bei“ (National Academies of Sciences, 2021: 4, Anm. Übersetzung der Autor*innen). Nach wie vor sind Risiken und Wirksamkeit von SAI nicht ausreichend verstanden (Barrett et al. 2014; Kravitz/MacMartin 2020; Lawrence et al. 2018; Schneider/Kaul/Pressel 2020). Zentrale Unsicherheiten betreffen:

- ▶ Mögliche nachteilige klimatologische Auswirkungen von SAI: SAI könnte klimatologische Systeme stark beeinflussen. Eine Veränderung der Niederschlagsverteilungen (Abiodun et al. 2021; Krishnamohan/Bala 2022) und eine Beeinflussung der terrestrischen Kohlenstoffaufnahme ist dabei sehr wahrscheinlich. Wichtig ist, dass SAI wahrscheinlich regional unterschiedliche Auswirkungen haben würde (Kravitz et al. 2017; National Academies of Sciences 2021), mit schwerwiegenden politischen, sozialen und ökologischen Folgen. Ein entscheidender Unterschied zwischen dem Einsatz von SAI und der Reduzierung von Treibhausgasemissionen besteht auch darin, dass ersteres keine dauerhafte Wirkung auf alle Seiten des Planeten hat, sondern lediglich auf die Tageslichtseite. Dies würde zu völlig neuen räumlichen Unterschieden und Mustern in den Energieflüssen der Atmosphäre führen.
- ▶ Die Zuverlässigkeit der Vorhersagekraft aktueller Modellprojektionen: Es bleibt eine große Unsicherheit, wie gut Klimamodelle die potenziellen Auswirkungen von SAI darstellen. Dies ist „eine wesentliche Unsicherheit hinsichtlich der potenziellen Implementierung dieser solar-klimatischen Interventionsstrategie“ (Fasullo & Richter, 2022: S. 1, Anm. Übersetzung der Autor*innen), die Fragen zu den globalen und regionalen klimatischen Auswirkungen von SAI sowie zu den chemischen und physikalischen Auswirkungen des Eintrags von Aerosolen in die Stratosphäre einschließt.
- ▶ Die Wirkung der injizierten Aerosole auf die stratosphärische: Eine Erhöhung der stratosphärischen Aerosole wie SO₂ würde die stratosphärischen Ozonwerte reduzieren (Tilmes et al. 2021), was zu einer erhöhten UV-Strahlung auf der Erdoberfläche führen würde. Derzeit wird in der Forschung untersucht, wie ein Ozonverlust durch geeignete Ersatzstoffe für SO₂ sicher vermieden werden könnte (Huynh/McNeill 2020; Kravitz/MacMartin 2020; Tilmes et al. 2022).

- ▶ Den Einfluss von SAI auf Niederschlagsmuster und andere (globale und regionale) Klimasysteme: Eines der primären Klimarisiken von SAI ist das von Veränderungen im regionalen hydrologischen Kreislauf. Derzeit ist unklar, welche Auswirkungen SAI auf den regionalen Niederschlag haben könnte, wobei ein Einfluss auf Niederschlagsmuster und Sturmverläufe wahrscheinlich ist (Cheng et al. 2019; National Academies of Sciences 2021; Tilmes et al. 2013). Ebenso bestehen weiterhin Unsicherheiten über die Auswirkungen von SAI auf die Landwirtschaft und die Ernteerträge (Trisos et al. 2018b) sowie auf terrestrische und marine Ökosysteme (Zarnetske et al. 2021). Erhebliche Unsicherheiten über die Genauigkeit von Modellprojektionen der Niederschlagsmuster unter SAI-Bedingungen bestehen weiterhin.
- ▶ Ob und wie SAI auf sichere, effektive und kontrollierbare Weise eingesetzt werden könnte: Viele Modellstudien setzen einen Einsatz von SAI unter ‚optimalen‘ Bedingungen voraus. Es bleibt jedoch offen, welche Art des Einsatzes die besten Ergebnisse liefern würden. Fragen zu dem geeigneten Breitengrad und zur richtigen Jahreszeit für einen Einsatz sowie zu Aerosoltypen sind allesamt Gegenstand der Forschung (Krishnamohan/Bala 2022; Lee et al. 2021; Lockley/MacMartin/Hunt 2020; Vioni et al. 2020; Zhao et al. 2021). Auch hier bestehen weiterhin Unsicherheiten über die Genauigkeit solcher Projektionen sowie ernsthafte Zweifel, ob ein optimaler Einsatz in der Realität umsetzbar wäre.

Beachtet werden sollte, dass all diese Unsicherheiten miteinander interagieren. Etwa verstärkt die Unsicherheit über die Auswirkungen von Aerosolen in der Stratosphäre auch Fragen zur Vorhersagegenauigkeit von Modellen. Unsicherheiten können überdies auch politische Auswirkungen haben. Veränderte Niederschlagsmuster könnten zu gestörten Monsunen führen, was erhebliche Ernteverluste, Hunger, Armut und schwere geopolitische Spannungen zur Folge haben könnte. Ebenso könnte die Unsicherheit über die regionale Differenzierung der Auswirkungen auch zu Streitigkeiten über die ‚optimale‘ Verteilung von SAI-Technologien führen.

3.2 Was wir über MCB (nicht) wissen

Marine Cloud Brightening (MCB) würde eine Abkühlung der Erde bewirken, indem die Reflektivität von niedrig hängenden Wolken über Teilen des Ozeans erhöht wird. Das Grundprinzip beruht darauf, durch das Einbringen zusätzlicher Partikel in die Wolken eine größere Anzahl von Kondensationskernen zu schaffen, um die sich Tröpfchen bilden können. Infolgedessen könnten Wolken mit demselben Wassergehalt aufgrund einer größeren inneren Oberfläche eine erhöhte Reflektivität entwickeln. Die klimatologische Forschung zu MCB stützt sich mehrheitlich auf Modelle, die mittels Projektionen die potenziellen Auswirkungen abzuschätzen versuchen. Es bestehen erhebliche Unsicherheiten hinsichtlich der potenziellen Auswirkungen von MCB, einschließlich seines Kühlspotenzials. Keine der SRM-Technologien ist in der Lage, den Klimawandel umzukehren. Es bleiben zahlreiche offene Fragen zur Wirksamkeit, technischen Umsetzung und den Risiken des Marine Cloud Brightening im Besonderen. Diese Unsicherheiten betreffen:

- ▶ Die Interaktion von Wolken und Aerosolen: Das Verständnis der Interaktionen zwischen Aerosolen und Wolken ist derzeit begrenzt, etwa hinsichtlich ihres Effekts auf die Lebensdauer und den Niederschlag der Wolken (Stjern et al. 2017) und ihrer Bedeutung für das Kühlungspotential von MCB.
- ▶ Den möglichen Einfluss MCB auf den Niederschlag und andere Klimasysteme: Wie SAI weist auch MCB viele Unsicherheiten in Bezug darauf auf, wie es mit dem Klimasystem interagieren könnte. MCB würde regional eingesetzt werden – während seine Auswirkungen

global sein sollen – aber die Wechselwirkungen zwischen der regionalen Anwendung von MCB und seinen globalen und ökologischen Auswirkungen (z.B. Latham et al., 2013) sind noch schlecht verstanden, z.B. sowohl in Bezug auf die Möglichkeit, das Pflanzenwachstum zu beeinflussen (Parkes/Challinor/Nicklin 2015) als auch die landwirtschaftliche Produktivität in tropischen Regionen (Muri/Niemeier/Kristjánsson 2015).

- ▶ Die Inkonsistenz von Modellprojektionen: Die Modelle sind sowohl miteinander teils im Widerspruch als auch mit empirischen Beobachtungsdaten in Bezug auf Aerosol-Wolken-Interaktionen, die Erhöhung der Albedo und regionale/globale Effekte (National Research Council 2015, S. 118). Dies wirft erneut ernsthafte Fragen zur Zuverlässigkeit und Gültigkeit von Modellprojektionen auf.
- ▶ Die Zuverlässigkeit der Vorhersagekraft aktueller Modellprojektionen: Wie im Fall von SAI basieren auch die Projektionen der Wirksamkeit von MCB auf Modellstudien. Auch hier besteht weiter eine große Unsicherheit darüber, wie gut Klimamodelle die potenziellen Auswirkungen von MCB darstellen. Derzeit sind sie mit Sicherheit noch nicht zuverlässig genug, um ausreichend gute Schätzungen der Wirksamkeit und Risiken von MCB zu liefern (Ahlm et al. 2017; National Research Council 2015) – ob sie es jemals könnten, bleibt ungewiss.
- ▶ Die Anwendung von MCB und dessen Einfluss auf lokale Ökosysteme: Derzeit fehlen die technischen Kapazitäten für die Anwendung von MCB. Es ist auch unklar, wie MCB marine Ökosysteme beeinflussen würde. Es bestehen erhebliche Unsicherheiten darüber, wie ein Forschungsprojekt angelegt werden könnte und wann es im Falle unerwünschter Effekte beendet werden sollte (Diamond et al. 2022).

3.3 Was wir über andere Technologien (nicht) wissen

Über SAI und MCB hinaus gab es in der Vergangenheit zahlreiche Überlegungen zu verschiedenen Technologien. Zu diesen gehören Konzepte wie Weltraumspiegel (z.B. Ferraro et al., 2015; Moore et al., 2010), das Aufhellen von Infrastrukturen, die genetische Modifikation von Pflanzen zur Erhöhung der Albedo ihrer Blätter (Ridgwell et al., 2009) sowie die Verwendung von Mondstaub, um die Erde vor einfallendem Sonnenlicht zu schützen (Bromley/Khan/Kenyon 2023). Allerdings werden die meisten dieser Technologien von SRM-Forscher*innen hinsichtlich ihres Potenzials für eine globale Abkühlung als nicht praktikabel angesehen. Dies liegt a) an ihren wirtschaftlichen Kosten und technischen Unsicherheiten (Weltraumspiegel, Mondstaub), b) an der projizierten Wirksamkeit (Aufhellen von Infrastrukturen) sowie an den potenziellen Risiken (genetische Modifikation von Pflanzen zur Albedoerhöhung, Mondstaub). Eine Alternative, die möglicherweise ein gewisses Potenzial aufweist, wenn auch nur regional, ist die Verdünnung von Zirruswolken:

Zirruswolkenverdünnung (Cirrus Cloud Thinning, CCT): Zirruswolken sind dünne, schleierartige Wolken in der oberen Troposphäre, die die Atmosphäre erwärmen, weil sie die ausgehende langwellige Strahlung stärker hemmen, als sie das einfallende Sonnenlicht reflektieren. Trotz dieses Effekts wird CCT in den meisten Veröffentlichungen als SRM-Methode behandelt, da sie mit der Absicht durchgeführt würde, das Klima regional oder global zu kühlen. In gewissem Maße würde es ähnliche Effekte und Risiken mit sich bringen. Theoretisch könnte das Verdünnen von Zirruswolken eine Nettoabkühlung des planetaren Systems bewirken. Dies könnte möglicherweise durch das Impfen von Zirruswolken mit Eiskernen geschehen, um größere Eiskristalle zu bilden, die dann schneller aus den Wolken fallen und deren Lebensdauer verkürzen könnten. Funktionieren könnte dies jedoch nur unter exakt richtigen meteorologischen Bedingungen. Derzeit ist CCT noch unzureichend verstanden. Ihr größter

potenzieller Vorteil gegenüber MCB und SAI wäre, dass es die Abgabe von mehr langwelliger Strahlung ermöglichen könnte – was durch steigende CO₂-Konzentrationen verhindert wird. Es ist jedoch derzeit unklar, ob die Methode anwendbar wäre. Forscher*innen haben ernsthafte Bedenken, dass ein Einsatz schlimmstenfalls zu einer stärkeren Erwärmung führen könnte. Für den Falle eines Funktionierens deuten Forschungen darauf hin, dass die Abkühlung wohlmöglich nicht global effektiv wäre, sondern möglicherweise nur zur Abkühlung der (ant)arktischen Regionen beitragen könnte (Gasparini et al. 2020; Gasparini/Lohmann 2016; Lohmann/Gasparini 2017). Große Unsicherheiten bestehen auch weiterhin in Bezug auf die Auswirkungen auf den regionalen Niederschlag, das genaue Kühlungspotenzial und die Umsetzbarkeit (National Academies of Sciences 2021; National Research Council 2015).

Erkenntnisse aus den SRM-Expert*innengesprächen

Aus den Expert*innengesprächen wurde deutlich, dass die meisten Forscher*innen, einschließlich jener, die an anderen Technologien arbeiten, MCB und SAI als die vielversprechendsten Technologien ansehen – obwohl weiterhin tiefe Meinungsverschiedenheiten über dieses Versprechen bestehen. Andere Technologien, wie weltraumgestützte Reflektionsmethoden, sind entweder zu teuer, technologisch zu fortschrittlich oder zu unsicher, um zu funktionieren. Die jüngste Forschung von Blaz Gasparini und Ulrike Lohmann hat beispielsweise gezeigt, dass ein Funktionieren von CCT im globalen Maßstab unwahrscheinlich ist – obwohl ein isolierter Anwendungsbereich zum Schutz der Eiskappen an den Polen möglich sein könnte. Die meisten Expert*innen, die SRM-Forschung unterstützen, befürworteten die Erforschung einer breiten Palette verschiedener SRM-Technologien, sind jedoch der Meinung, dass SAI und MCB priorisiert werden sollten, da diese Technologien sowohl die globale Temperatur beeinflussen als auch innerhalb einiger Jahrzehnte einsatzbereit sein könnten.

Im Vergleich von MCB und SAI sprachen einige Expert*innen eine Präferenz oder Priorität für die MCB-Forschung aus, da sie diese als weniger riskant erachteten. Dies betraf insbesondere den Zeitrahmen der Anwendung: MCB-Interventionen würden, einmal beendet, innerhalb von Wochen ihre Wirkung verlieren. Stratosphärische Aerosole würden hingegen ein oder zwei Jahre in der Stratosphäre verbleiben. Dennoch stimmten die Wissenschaftler*innen darin überein, dass beide Technologien angesichts ihrer Risike niemals in Betracht gezogen werden sollen, bestünde nicht die Gefahr der katastrophalen Folgen des Klimawandels. Angesichts der Wahrscheinlichkeit eines extremen Klimawandels befürworteten Wissenschaftler*innen, die SRM unterstützen, weiterhin eine rigorose Erforschung und potenzielle Entwicklung dieser Technologien. Wichtig ist, dass diese auch politische und soziale Forschung in Bezug auf Entscheidungsfindung, Überwachung sowie Fragen der Gerechtigkeit und Gleichheit umfasst.

Unsere persönliche Einschätzung ist, dass der SRM-Forschung in den letzten Jahren in der wissenschaftlichen Gemeinschaft mit zunehmender Akzeptanz begegnet wird, nicht zuletzt aufgrund der wachsenden Besorgnis über die Auswirkungen des Klimawandels. Dennoch sind sich die Forscher*innen uneinig darüber, welche Technologien das meiste Potenzial und das ausgeprägteste Risiko aufweisen und ob eine Anwendung von SRM überhaupt möglich und aufrechtzuerhalten wäre.

4 Das Potenzial von SRM: Einigkeit und Kontroversen

Angesichts der erheblichen Unsicherheiten im Zusammenhang mit SRM sind die umfangreichen Meinungsverschiedenheiten hinsichtlich der Rolle von SRM in der Klimapolitik nicht verwunderlich. Für einige stellt SRM ein Tabu dar – zu riskant, politisch aufgeladen und unsicher, um ernsthaft in Betracht gezogen zu werden. Für andere könnte SRM möglicherweise eine Linderung der schlimmsten Schäden des Klimawandels bieten. Trotz dieser Meinungsverschiedenheiten sind sich die Forscher*innen im Allgemeinen in den folgenden Punkten einig:

- ▶ SRM ist kein Ersatz für eine schnelle und vollständige Abkehr von fossilen Brennstoffen. Es kann die herkömmliche Emissionsreduktion und Klimaschutzmaßnahmen nicht ersetzen.
- ▶ SRM könnte potenziell die Erwärmung überdecken, wirkt jedoch nicht auf Ursache der globalen Erwärmung und kann diese auch nicht eins zu eins rückgängig machen.
- ▶ SRM-Technologien, die darauf abzielen, die Erwärmung im globalen Maßstab zu bekämpfen, sind hoch riskant und unsicher.
- ▶ Die SRM-Forschung im kleinen Maßstab im Freien stellt keine unmittelbaren ökologischen und geophysikalischen Risiken dar, wirft jedoch ernste politische Bedenken und Empfindlichkeiten auf. Andererseits zweifeln viele Forscher*innen auch am Wert von Experimenten im kleinen Maßstab.
- ▶ SRM könnte die durchschnittlichen globalen Temperaturen senken, die regionalen Effekte jedoch bleiben höchst ungewiss. Darüber hinaus könnte SRM globale Niederschlagsmuster beeinflussen.
- ▶ SRM hat keine Wirkung auf die schädlichen Folgen des Klimawandels, die über die direkt mit der Erwärmung verbundenen Effekte hinausgehen. Zum Beispiel werden ernsthafte Auswirkungen wie die Versauerung der Ozeane nicht adressiert.
- ▶ SRM könnte noch unbekannte, unvorhersehbare schädliche und gelegentlich auch vorteilhafte Effekte hervorrufen.
- ▶ Obwohl die wissenschaftlichen und ökologischen Risiken erheblich sind, liegen die schwerwiegendsten und unlösbarsten Risiken von SRM in Fragen der Governance, Gerechtigkeit, Macht, Sicherheit und Geopolitik.

Gleichzeitig bestehen erhebliche und unlösbare Meinungsverschiedenheiten über die Risiken, die Wirksamkeit und die politischen Dimensionen von SRM, sowohl in Bezug auf die Forschung als auch auf die Umsetzung. Diese Meinungsverschiedenheiten umfassen:

- ▶ Ob und in welchem Ausmaß SRM herkömmliche Klimaschutzmaßnahmen ergänzen soll und darf;
- ▶ Inwieweit SRM-Technologien die globale Erwärmung und die damit verbundenen Risiken ausgleichen könnten;
- ▶ Inwieweit die Auswirkungen von SRM auf Niederschläge, Ökosysteme und nationale Sicherheit kontrolliert werden können (technologisch und politisch);
- ▶ Die Versprechen und Risiken einzelner SRM-Technologien sowie ihre potenziellen Wechselwirkungen miteinander und mit dem sich verändernden globalen Klima;

- ▶ Die Erwünschtheit und politischen Risiken der SRM-Forschung, einschließlich der Wahrscheinlichkeit einer Ablenkung von der Emissionsreduktion durch Forschung und das Risiko, dass durch die Forschung eine unumkehrbare Entwicklung hin zur Umsetzung von SRM entsteht.
- ▶ Die Erwünschtheit und geopolitischen Risiken eines möglichen SRM-Einsatzes, insbesondere in Bezug auf Gerechtigkeit, nationale Sicherheit, demokratische Entscheidungsfindung und historische Verantwortlichkeiten;
- ▶ Die Gültigkeit und Zuverlässigkeit modellbasierter Projektionen der Auswirkungen und Wirksamkeit der SRM-Anwendung;
- ▶ Die Frage, ob die mit SRM verbundenen Risiken durch weitere Forschung ausreichend minimiert werden können;
- ▶ Die Unterscheidung zwischen Forschung und Entwicklung, insbesondere in Bezug auf Feldexperimente.

5 Governance, Forschung und Moratorien

Die schwierigsten Fragen im Zusammenhang mit SRM betreffen zweifellos Geopolitik, Governance und Gerechtigkeit. Mike Hulme (2014) bezeichnete SRM einst als unerwünscht, unregierbar und unerreichbar, und seine Bedenken sind nach wie vor gültig. Aktuelle Modellierungsforschung zu SRM geht häufig von einem Koordinationsniveau beim Einsatz aus, das in der realen Welt kaum erreichbar sein wird (Corry 2017; Low/Honegger 2020; McLaren 2018). Es bestehen grundlegende Meinungsverschiedenheiten darüber, ob die Auswirkungen von SRM jemals ausreichend verstanden werden könnten, bevor ein Einsatz erfolgt (Oomen 2021). Darüber hinaus äußert die Literatur zu Governance-Fragen erhebliche Bedenken hinsichtlich der Frage, wie insbesondere SAI auf gerechte und demokratische Weise gesteuert werden könnte (Flegal et al. 2019; Flegal/Gupta 2018; Jinnah et al. 2019; McLaren/Corry 2021a). Bereits jetzt gibt es starken Widerstand gegen Feldexperimente und Forschung (Grieger et al. 2019). Forschung und Anwendung von SRM können nicht von politischen Realitäten und wissenschaftlichen Überzeugungen getrennt werden. Es ist daher von entscheidender Bedeutung zu untersuchen, wie SRM nicht nur die Klimapolitik, sondern auch andere politische Ziele weltweit beeinflussen könnte. Ebenso muss berücksichtigt werden, inwieweit die SRM-Forschung selbst Teil wirtschaftlicher und politischer Konfigurationen ist und zu diesen beiträgt. Diese Fragen umfassen Themen wie die Finanzierung und Kontrolle solcher Technologien (Surprise, 2022), die Verflechtung von SRM-Forschung mit militärischen und wirtschaftlichen Interessen sowie die Weltanschauungen und Ideologien, die sowohl die Wissensproduktion als auch die relevanten Netzwerke rund um SRM untermauern. In der wissenschaftlichen Literatur werden mehrere zentrale Governance-Bedenken immer wieder hervorgehoben. Zu diesen zentralen zählen unter anderem:

- ▶ **SAI könnte von der Emissionsreduktion ablenken:** Die meisten Wissenschaftler*innen sehen die Gefahr, dass SRM eine politische Rolle einnimmt, in der diese Technologien, implizit oder explizit, von einer umfassenden Dekarbonisierung ablenken. Politische Akteure könnten geneigt sein, SRM-Optionen zu befürworten, um Lösungen und vielversprechende Maßnahmen zu präsentieren, die unpopuläre Emissionsreduzierungen oder kostspielige Klimaanpassungsmaßnahmen vermeiden. Alternativ könnten wissenschaftliche Bewertungen oder politische Verfahren implizit oder unabsichtlich auf einen erfolgreichen Einsatz von SRM setzen, was zu unbeabsichtigten Verzögerungen bei der Dekarbonisierung führen oder politisch ausgenutzt werden könnte (McLaren 2016).
- ▶ **Die infrastrukturelle und/oder politische Verfestigung der Nutzung dieser Technologien:** Es ist in der Politikwissenschaft gut bekannt, dass einmal umgesetzte politische Maßnahmen oder etablierte Institutionen dazu neigen, ihre Existenz zu rechtfertigen, indem sie sich selbst verstärken und fortbestehen. Ein starke Sorge in der wissenschaftlichen Literatur besteht darin, dass der Aufbau einer Forschungsinfrastruktur rund um SRM zu einem solchen selbstverstärkenden Prozess führen könnte, der den Einsatz von SRM unvermeidlich macht (z.B. Cairns, 2014; Flegal et al., 2019; McKinnon, 2019; McLaren & Corry, 2021).
- ▶ **Militärische und sicherheitspolitische Auswirkungen von SRM:** SRM kann nicht von Machtkämpfen und geopolitischen Konflikten getrennt werden. Fast alle SRM-Forscher*innen sind sich einig, dass die Governance von SRM, insbesondere die Anwendung, aber auch die Forschung, zu schweren geopolitischen Spannungen führen könnte. Die ungleiche Verteilung der Auswirkungen, z.B. auf Niederschlagsmuster oder das Risiko extremer Wetterereignisse zwischen Regionen und Ländern, birgt das Potenzial für

geopolitische Spannungen. Darüber hinaus könnten die Technologien selbst von militärischer und politischer Seite als Sicherheitsrisiken interpretiert werden, und Spannungen über die Kontrolle oder Auswirkungen von SRM könnten so zu Misstrauen und politischen oder sogar militärischen Konflikten führen (z.B. Chalecki & Ferrari, 2018; Corry, 2017; Heyen et al., 2019; Robock, 2015). Die Geschichte des Geoengineering deutet darauf hin, dass eine solche Entwicklung nicht ohne historisches Beispiel wäre (Baskin 2019; Fleming 2010; Oomen 2021) – wir würden hinzufügen, dass sie sogar wahrscheinlich wäre.

- ▶ **Inkompatibilität mit demokratischer Entscheidungsfindung:** In einem frühen Papier äußerten Szerszynski und Kolleg*innen Bedenken, ob SRM jemals auf demokratische Weise regiert werden könnte (Szerszynski et al. 2013). Obwohl das Papier umstritten war (z.B. Horton et al., 2018), bleiben Bedenken bestehen, ob SRM eine autokratische, technokratische oder schlicht undemokratische Entscheidungsfindung begünstigen könnte.
- ▶ **Gerechtigkeit in Bezug auf die Anwendung, Forschung und Klimaschutzpolitik:** Viele Kritiker*innen befürchten, dass SRM nicht auf faire und gerechte Weise umgesetzt werden könnte (z.B. Grasso, 2022; McLaren, 2018). Wie Clive Hamilton frühzeitig ausdrückte, wäre die Annahme naiv, dass die Erforschung und Anwendung von SRM deutlicher um Gerechtigkeit und Gleichberechtigung bemüht wäre als die Klimapolitik im Allgemeinen (Hamilton 2013a, Hamilton 2013b). Hingegen argumentieren Befürworter*innen der SRM-Forschung, dass gerade eine Abkehr von potenziell nützlichen Technologien aufgrund von Abneigungen in akademischen Kreisen oder von politischen Bedenken ungerecht wäre. Dieses Argument setzt jedoch voraus, dass SRM nur positive Effekte hätte.
- ▶ **Spannungen zwischen einer gerechten Anwendung und nationalen (oder gar kommerziellen) Interessen:** Die meisten Bewertungen gehen davon aus, dass SRM auf eine optimierte, weitestgehend konsensuelle oder gar als gerecht betrachtete Weise angewendet würde. Dies ist jedoch keineswegs selbstverständlich, da eine solche Anwendung vielleicht, oder sogar sehr wahrscheinlich, in direktem Widerspruch zu nationalen oder gar kommerziellen Interessen stünde (z.B. Morrow, 2020).

Aufgrund dieser Unsicherheiten und Bedenken hat kürzlich eine Gruppe von über 500 Wissenschaftler*innen und Governance-Expert*innen zu einem internationalen Non-Use-Agreement – einem Nichtnutzungsabkommen – zu Solarem Geoengineering aufgerufen, das inzwischen auch von mehr als 1900 zivilgesellschaftlichen Organisationen unterstützt wird. Dieser Aufruf zu einem Nichtnutzungsabkommen wurde ausdrücklich als Reaktion auf die zunehmende Normalisierung der SRM-Forschung formuliert und wird unter anderem von Frank Biermann, Melissa Leach, Dirk Messner, Janez Potočnik und Jeroen Oomen unterstützt, die gemeinsam mit anderen Kolleg*innen den ersten Artikel verfassten, der die Konturen eines solchen Nichtnutzungsabkommens darlegt (Biermann et al., 2022). Ein solches Nichtnutzungsabkommen könnte folgende Bestimmungen für unterzeichnende Staaten umfassen:

1. „Die Verpflichtung, ihren nationalen Forschungsfördereinrichtungen zu untersagen, die Entwicklung von Technologien für Solares Geoengineering zu unterstützen, sowohl im eigenen Land als auch durch internationale Institutionen.
2. Die Verpflichtung, Freilandexperimente mit Technologien des Solaren Geoengineering in ihrem Hoheitsgebiet zu verbieten.
3. Die Verpflichtung, keine Patentrechte für Technologien für Solares Geoengineering zu erteilen, einschließlich unterstützender Technologien wie die Nachrüstung von Flugzeugen für Aerosol-Injektionen.

4. Die Verpflichtung, keine Technologien für Solares Geoengineering einzusetzen, wenn diese von Dritten entwickelt wurden.
5. Die Verpflichtung, gegen eine mögliche Institutionalisierung des planetaren Solaren Geoengineerings als Politikoption in den einschlägigen internationalen Institutionen Einspruch zu erheben, einschließlich der Berichte des Weltklimarats (IPCC)“ (Biermann et al., 2022, Anm.: Übersetzung der Autor*innen).

Der Aufruf zu einem Nichtnutzungsabkommen hat zahlreiche Diskussionen unter SRM-Forscher*innen ausgelöst und sowohl positive als auch negative Reaktionen hervorgerufen haben, sowie zu neuen offenen Briefen zur Unterstützung der SRM-Forschung geführt, wie beispielsweise dem „climate-intervention-research-letter“. Seitens der SRM-Forscher*innen besteht weitgehend Einigkeit darüber, dass ein Moratorium für den Einsatz von SRM zeitgemäß und notwendig ist. Gleichzeitig verwehren sich viele SRM-Forscher*innen jedoch strengen Vorgaben und einer teilweise Definanzierung der SRM-Forschung und -Entwicklung. Infolgedessen sind die Vorzüge und Schwächen des Vorschlags für ein Nichtnutzungsabkommen Gegenstand wissenschaftlicher Debatten.

Erkenntnisse aus den SRM-Expert*innengesprächen

In den Expert*innengesprächen zu SRM, die eine hauptsächlich naturwissenschaftlicher Ausrichtung hatte, wurde das Non-Use-Agreement nur in Teilen diskutiert. Es zeigte sich jedoch, dass viele der wissenschaftlichen Expert*innen einem generellen Verbot von SRM-Forschung und -Entwicklung ablehnend gegenüberstanden. Darüber hinaus waren die meisten Forscher*innen aus den Naturwissenschaften der Meinung, dass öffentliche Finanzierungsmittel eine Schlüsselrolle in der SRM-Forschung spielen sollten, da ohne öffentliche Finanzierung die SRM-Forschung weniger transparent oder schlicht einseitig werden könnte. Viele Wissenschaftler*innen widersprachen auch der Ansicht, dass SRM-Forschung zwangsläufig zu einer Normalisierung, Entwicklung und Implementierung von SRM führen würde. Oft wiesen sie darauf hin, dass sich SRM erst durch Forschung als weniger effektiv und gefährlicher als angenommen erwiesen habe. Aus dieser Warte könnte weitere sehr starke Argumente gegen die Implementierung von SRM das Ergebnis weiterer SRM-Forschung sein.

Gleichzeitig war sich die Mehrheit der Teilnehmer*innen einig, dass sowohl ein Nichtnutzungsabkommen als auch weit strengere Formen der Forschungsregulierung notwendig sind. Bestehende Rahmenwerke wie die Responsible Research and Innovation (RRI) könnten ein guter Ausgangspunkt sein, können aber die einzigartigen und erheblichen politischen Risiken von SRM nicht abdecken.

Wissenschaftler*innen plädierten auch für eine Demokratisierung der SRM-Forschung. Wer entscheidet, welches Wissen wichtig ist? Wer zahlt für die Forschung? Und worin bestehen die Implikationen solcher Fragen?

Derzeit nehmen die Autor*innen dieses Diskussionspapiers keine spezifische Position zu den Einzelheiten eines erforderlichen Nichtnutzungsabkommens ein. Es wird jedoch ausdrücklich hervorgehoben, dass ein solches Abkommen unbestritten *notwendig* ist, auch wenn die genaue Formulierung eines zukünftigen politischen Abkommens in Bezug auf die Unerwünschtheit der SRM-Implementierung sowie eine potenzielle Unerwünschtheit von SRM-Forschung zur Diskussion steht. Wie in diesem Papier dargelegt, würde die Anwendung von SRM basierend auf dem derzeitigen Wissensstand inakzeptable und irreparable geophysikalische, bioökologische und politische Risiken mit sich bringen. Obwohl Forschung an sich keine zwangsläufigen physikalischen Gefahren birgt, sind die damit verbundenen politischen Risiken erheblich und

sollten anerkannt werden. Insofern nehmen wir keine spezifische Position zur Finanzierung der Forschung ein, bekräftigen jedoch die dringende Notwendigkeit eines *Nichtnutzungsabkommens* zu SRM, das den CBD-Beschluss X/33 unterstützt und umsetzt.

6 Fazit

SRM ist ein höchst umstrittenes Thema. Die Implementierung dieser invasiven Technologien wäre mit schwerwiegenden und weitgehend unvorhersehbaren technologischen, ökologischen und geopolitischen Risiken verbunden. In der Wissenschaft besteht erhebliche Uneinigkeit über das Ausmaß dieser Risiken, darüber, wie diese im Verhältnis zu den erhöhten Risiken des Klimawandels stehen, und ob derartige Unsicherheiten überhaupt aufgelöst werden können (Oomen, 2021; NAS, 2021). Diese Meinungsverschiedenheiten resultieren aus divergierenden Sichtweisen auf technische Risiken und Nutzen, politischen Sensibilitäten sowie unterschiedlichen Weltanschauungen und Werten. In diesem Kontext stellt die politische Regulierung von SRM, sowohl im Hinblick auf die Forschung als auch auf die Anwendung, eine dringende und schwer zu bewältigende Herausforderung dar. Forschungs- und politische Entscheidungen, die heute getroffen werden, werden die Governance von SRM für Jahrzehnte prägen. Es ist offenkundig, dass Fragen zur SRM-Forschung und -regulierung nicht von einem politischen System entkoppelt werden können, in dem schmerzliche Entscheidungen häufig durch den Verweis auf ungewisse technologische Lösungen vermieden werden. Solche Annahmen können sogar in wissenschaftlichen Projektionsmodellen, auch zu SRM, implizit verankert sein. Dies verdeutlicht, dass eine „reine Forschung“ illusorisch ist. Forschung orientiert sich oft an bestehenden Governance- und Politikbedürfnissen, während diese wiederum durch aktuelle Forschung beeinflusst werden. Darüber hinaus könnten Forschungsnormen und -definitionen die Politik *de facto* statt *de jure* prägen (Gupta/Möller 2019). Dies unterstreicht die Notwendigkeit, mit äußerster Vorsicht an die SRM-Forschung – und die damit verbundenen Rahmenbedingungen – heranzugehen.

Alle Expert*innen waren sich einig, dass SRM keine Lösung für den Klimawandel ist und sein kann. Es kann die Emissionsreduktion nicht ersetzen. Ob es eine Versicherung gegen die schlimmsten Auswüchse des Klimawandels sein könnte, bleibt Teil einer hitzigen Debatte. Daher empfehlen wir:

- ▶ Konsistente und kontinuierliche Bemühungen um ein **multilaterales Moratorium zur Nutzung von SRM**. In Abwesenheit eines multilateralen Abkommens könnte ein Nichtnutzungsabkommen auch die Form einer Art Koalition der Willigen annehmen.
- ▶ Die Entwicklung eines **restriktiven Rahmens für Forschung** in Zusammenarbeit mit Forscher*innen aus unterschiedlichen geografischen und disziplinären Hintergründen. Ein solcher Rahmen muss die SRM-Forschung nicht verbieten, sondern sie vielmehr anhand a) ihrer Intention, b) ihres Umfangs, c) ihrer Finanzierung, d) ihrer Transparenz und e) ihren partizipativen Prozessen regeln. Anstatt technologische und wissenschaftliche Fragen in den Vordergrund zu stellen, sollte dieser Rahmen politische und gesellschaftliche Risiken als Ausgangspunkt nehmen. Bestehende Rahmenwerke wie Responsible Research and Innovation (RRI) können zwar eine gewisse Orientierung bieten, können jedoch die einzigartigen und erheblichen politischen Risiken von SRM nicht abdecken und müssen daher erweitert werden. Eine Selbstregulierung der Forschung sollte keine Option sein.
- ▶ Die **Unterstützung für die Weiterentwicklung von SRM-Technologien zurückzuhalten**, solange keine strengere Forschungsregulierung besteht, insbesondere in Bezug auf öffentliche Konsultationen und Meinungsvielfalt.
- ▶ **Anreize und Möglichkeiten für Forscher*innen** in Bezug auf Zeit und Finanzierung bereitzustellen, um solche Rahmenwerke in Zusammenarbeit mit der Forschungsförderung zu entwickeln.

Wir betonen abschließend die dringende Notwendigkeit eines Nichtnutzungsabkommens zu SRM, das auf der Operationalisierung des CBD-Beschlusses X/33 basiert. Die Vorzüge und Mängel bestehender Aufrufe zu einem Nichtnutzungsabkommen bleiben sowohl für die politische als auch für die wissenschaftliche Debatte offen.

7 Quellenverzeichnis

- Abiodun, B. J./Odoulami, R. C./Sawadogo, W./Oluniyo, O. A./Abatan, A. A./New, M./Lennard, C./Izidine, P./Egbebiyi, T. S./MacMartin, D. G. (2021): Potential impacts of stratospheric aerosol injection on drought risk managements over major river basins in Africa. In: *Climatic Change*, 169 (31), 1-19.
- Ahlm, L./Jones, A./Stjern, C. W./Muri, H./Kravitz, B./Kristjánsson, J. E. (2017): Marine cloud brightening – as effective without clouds. In: *Atmospheric Chemistry and Physics*, 17 (21), 13071–13087.
- Barnes, P. W./Williamson, C. E./Lucas, R. M./Robinson, S. A./Madronich, S./Paul, N. D./Bornman, J. F./Bais, A. F./Sulzberger, B./Wilson, S. R./Andrady, A. L./McKenzie, R. L./Neale, P. J./Austin, A. T./Bernhard, G. H./Solomon, K. R./Neale, R. E./Young, P. J./Norval, M./Rhodes, L. E./Hylander, S./Rose, K. C./Longstreth, J./Aucamp, P. J./Ballaré, C. L./Cory, R. M./Flint, S. D./de Gruijl, F. R./Häder, D.-P./Heikkilä, A. M./Jansen, M. A. K./Pandey, K. K./Robson, T. M./Sinclair, C. A./Wängberg, S.-Å./Worrest, R. C./Yazar, S./Young, A. R./Zepp, R. G. (2019): Ozone depletion, ultraviolet radiation, climate change and prospects for a sustainable future. In: *Nature Sustainability*, 2 (7), 569–579.
- Barrett, S./Lenton, T. M./Millner, A./Tavoni, A./Carpenter, S./Anderies, J. M./Chapin, F. S./Crépin, A.-S./Daily, G./Ehrlich, P./Folke, C./Galaz, V./Hughes, T./Kautsky, N./Lambin, E. F./Naylor, R./Nyborg, K./Polasky, S./Scheffer, M./Wilén, J./Xepapadeas, A./de Zeeuw, A. (2014): Climate engineering reconsidered. In: *Nature Climate Change*, 4 (7), 527–529.
- Baskin, J. (2019): *Geoengineering, the Anthropocene and the End of Nature*. Cham: Palgrave Macmillan, <https://doi.org/10.1007/978-3-030-17359-3>
- Biermann, F. (2021): It is dangerous to normalize solar geoengineering research. In: *Nature*, 595 (7865), 30–30.
- 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./Potočník, J./Schlosberg, D./Scobie, M./VanDeveer, S. D. (2022): Solar geoengineering: The case for an international non-use agreement. In: *WIREs Climate Change*, 13(3).
- Bromley, B. C./Khan, S. H./Kenyon, S. J. (2023): Dust as a solar shield. In: *PLOS Climate*, 2(2), S. e0000133, <https://doi.org/10.1371/journal.pclm.0000133>
- Buck, H. J./Gammon, A. R./Preston, C. J. (2014): Gender and Geoengineering. In: *Hypatia*, 29 (3), 651–669.
- Cairns, R. C. (2014): Climate geoengineering: issues of path-dependence and socio-technical lock-in. In: *WIREs Climate Change*, 5(5), 649–661.
- Chalecki, E. L./Ferrari, L. L. (2018): A New Security Framework for Geoengineering. In: *Strategic Studies Quarterly*, 12(2), 82–106.
- Cheng, W./MacMartin, D. G./Dagon, K./Kravitz, B./Tilmes, S./Richter, J. H./Mills, M. J./Simpson, I. R. (2019): Soil Moisture and Other Hydrological Changes in a Stratospheric Aerosol Geoengineering Large Ensemble. In: *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 124 (23), 12773–12793.
- Civil Engineering Research Foundation (CERF) (Ed.) (1994): *Geo-engineering: A Vision for the 21st Century*, <https://clinton.presidentiallibraries.us/items/show/99362>
- Corry, O. (2017): The international politics of geoengineering: The feasibility of Plan B for tackling climate change. In: *Security Dialogue*, 48 (4), 297–315.
- Diamond, M. S./Gettelman, A./Lebsock, M. D./McComiskey, A./Russell, L. M./Wood, R./Feingold, G. (2022): Opinion: To assess marine cloud brightening’s technical feasibility, we need to know what to study-and when to stop. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 119 (4), e2118379119.

- European Commission/High Representative of the Union for Foreign Affairs and Security Policy (2023): Joint Communication to the European Parliament and the Council. A new outlook on the climate and security nexus: Addressing the impact of climate change and environmental degradation on peace, security and defence. Brussels, Belgium, https://www.eeas.europa.eu/eeas/joint-communication-climate-security-nexus_en
- Fasullo, J. T./Richter, J. H. (2022): Scenario and Model Dependence of Strategic Solar Climate Intervention in CESM. <http://www.essoar.org/doi/10.1002/essoar.10511096.1>
- Ferraro, A. J./Charlton-Perez, A. J./Highwood, E. J. (2015): Stratospheric dynamics and midlatitude jets under geoengineering with space mirrors and sulfate and titania aerosols. In: *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 120 (2), 414–429.
- Flegal, J. A./Gupta, A. (2018): Evoking equity as a rationale for solar geoengineering research? Scrutinizing emerging expert visions of equity. In: *International Environmental Agreements: Politics, Law and Economics*, 18 (1), 45–61.
- Flegal, J. A./Hubert, A.-M./Morrow, D. R./Moreno-Cruz, J. B. (2019): Solar Geoengineering: Social Science, Legal, Ethical, and Economic Frameworks. In: *Annual Review of Environment and Resources*, 44 (1), 399–423.
- Fleming, J. R. (2010): *Fixing the Sky: The Checkered History of Weather and Climate Control*. New York, Columbia University Press.
- Gasparini, B./Lohmann, U. (2016): Why cirrus cloud seeding cannot substantially cool the planet. In: *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 121 (9), 4877–4893.
- Gasparini, B./McGraw, Z./Storelvmo, T./Lohmann, U. (2020): To what extent can cirrus cloud seeding counteract global warming? In: *Environmental Research Letters*, 15 (5), 054002.
- Grasso, M. (2022): "Legitimacy and Procedural Justice: How Might Stratospheric Aerosol Injection Function in the Public Interest?" In: *Humanities and Social Sciences Communications*, 9 (1), 1–9.
- Grieger, K. D./Felgenhauer, T./Renn, O./Wiener, J./Borsuk, M. (2019): "Emerging Risk Governance for Stratospheric Aerosol Injection as a Climate Management Technology." In: *Environment Systems and Decisions*, 39 (4), 371–382.
- Gupta, A./Möller, I. (2019): "De Facto Governance: How Authoritative Assessments Construct Climate Engineering as an Object of Governance." In: *Environmental Politics*, 28 (3), 480–501.
- Hamilton, C. (2013a): "No, We Should Not Just 'At Least Do the Research'." In: *Nature*, 496 (7444), 139–139.
- Hamilton, C. (2013b): *Earthmasters: the dawn of the age of climate engineering*. New Haven & London, Yale University Press.
- Heyen, D./Horton, J./Moreno-Cruz, J. (2019): "Strategic Implications of Counter-Geoengineering: Clash or Cooperation?" In: *Journal of Environmental Economics and Management*, 95, 153–177.
- Honegger, M./Derwent, H./Harrison, N./Michaelowa, A./Schäfer, S. (2018): Carbon Removal and Solar Geoengineering. Potential implications for delivery of the Sustainable Development Goals | Institute for Advanced Sustainability Studies. <https://www.iass-potsdam.de/de/ergebnisse/publikationen/2018/carbon-removal-and-solar-geoengineering-potential-implications>
- Honegger, M./Michaelowa, A./Pan, J. (2021): "Potential Implications of Solar Radiation Modification for Achievement of the Sustainable Development Goals." In: *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 26 (5).
- Horton, J. B./Reynolds, J. L./Buck, H. J./Callies, D./Schäfer, S./Keith, D. W./Rayner, S. (2018): "Solar Geoengineering and Democracy." In: *Global Environmental Politics*, 18 (3), 5–24.

- Hulme, M. (2014): *Can Science Fix Climate Change?: A Case Against Climate Engineering*, Cambridge (UK): John Wiley & Sons.
- Huynh, H. N./McNeill, V. F. (2020): "Heterogeneous Chemistry of CaCO₃ Aerosols with HNO₃ and HCl." In: *The Journal of Physical Chemistry A*, 124 (19), 3886–3895.
- Irvine, P./Emanuel, K./He, J./Horowitz, L. W./Vecchi, G./Keith, D. (2019): "Halving Warming with Idealized Solar Geoengineering Moderates Key Climate Hazards." In: *Nature Climate Change*, 9 (4), 295–299.
- Jinnah, S./Nicholson, S./Morrow, D. R./Dove, Z./Wapner, P./Valdivia, W./Thiele, L. P./McKinnon, C./Light, A./Lahsen, M./Kashwan, P./Gupta, A./Gillespie, A./Falk, R./Conca, K./Chong, D./Chhetri, N. (2019): "Governing Climate Engineering: A Proposal for Immediate Governance of Solar Radiation Management." In: *Sustainability*, 11 (14), 3954.
- Kravitz, B./MacMartin, D. G. (2020): "Uncertainty and the Basis for Confidence in Solar Geoengineering Research." In: *Nature Reviews Earth & Environment*, 1 (1), 64–75.
- Kravitz, B./MacMartin, D. G./Mills, M. J./Richter, J. H./Tilmes, S./Lamarque, J.-F./Tribbia, J. J./Vitt, F. (2017): "First Simulations of Designing Stratospheric Sulfate Aerosol Geoengineering to Meet Multiple Simultaneous Climate Objectives." In: *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 122 (23), 12,616–12,634.
- Krishnamohan, K. S./Bala, G. (2022): "Sensitivity of Tropical Monsoon Precipitation to the Latitude of Stratospheric Aerosol Injections." In: *Climate Dynamics*, 59 (1–2), 151–168.
- Latham, J./Kleypas, J./Hauser, R./Parkes, B./Gadian, A. (2013): "Can Marine Cloud Brightening Reduce Coral Bleaching?" In: *Atmospheric Science Letters*, 14 (4), 214–219.
- 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." In: *Nature Communications*, 9 (1), 3734.
- Lee, W. R./MacMartin, D. G./Visoni, D./Kravitz, B. (2021): "High-Latitude Stratospheric Aerosol Geoengineering Can Be More Effective if Injection Is Limited to Spring." In: *Geophysical Research Letters*, 48 (9), e2021GL092696.
- Lockley, A./MacMartin, D./Hunt, H. (2020): "An Update on Engineering Issues Concerning Stratospheric Aerosol Injection for Geoengineering." In: *Environmental Research Communications*, 2 (8), 082001.
- Lohmann, U./Gasparini, B. (2017): "A Cirrus Cloud Climate Dial?" In: *Science*, 357 (6348), 248–249.
- Lovelock, J. (2008): "A Geophysicist's Thoughts on Geoengineering." In: *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 366 (1882), 3883–3890.
- Low, S./Honegger, M. (2020): A Precautionary Assessment of Systemic Projections and Promises From Sunlight Reflection and Carbon Removal Modeling. In: *Risk Analysis*, 42 (9), 1965-1979.
- Lüring, M./MacKay, E./Reitzel, K./Spears, B. M. (2016): Special Issue on Geo-engineering to Manage Eutrophication in Lakes. In: *Water Research*, 97, 30271-30278.
- McDonald, M. (2022): Geoengineering, climate change and ecological security. In: *Environmental Politics*, 32 (4), 565-585.
- McKinnon, C. (2019): "Sleepwalking into Lock-in? Avoiding Wrongs to Future People in the Governance of Solar Radiation Management Research." In: *Environmental Politics*, 28 (3), 441–459.
- McLaren, D. (2016): "Mitigation Deterrence and the 'Moral Hazard' of Solar Radiation Management." In: *Earth's Future*, 4 (12), 596–602.

- McLaren, D. P. (2018): "Whose Climate and Whose Ethics? Conceptions of Justice in Solar Geoengineering Modelling." In: *Energy Research & Social Science*, 44, 209–221.
- McLaren, D./Corry, O. (2021a): "The Politics and Governance of Research into Solar Geoengineering." In: *WIREs Climate Change*, 12 (3), e707.
- McLaren, D./Corry, O. (2021b): "Clash of Geofutures and the Remaking of Planetary Order: Faultlines Underlying Conflicts over Geoengineering Governance." In: *Global Policy*, 12 (S1), 20–33.
- Mettiäinen, I./Buck, H. J./MacMartin, D. G./Ricke, K. L. (2022): "'Bog Here, Marshland There': Tensions in Co-producing Scientific Knowledge on Solar Geoengineering in the Arctic." In: *Environmental Research Letters*, 17 (4), 045001.
- Moore, J. C./Jevrejeva, S./Grinsted, A. (2010): "Efficacy of Geoengineering to Limit 21st Century Sea-Level Rise." In: *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107 (36), 15699–15703.
- Morgenstern, N. R. (2000): *Common Ground*. Paper presented at the ISRM International Symposium, Melbourne, Australia, November 2000. <https://onepetro.org/ISRMIS/proceedings-abstract/IS00/All-IS00/ISRM-IS-2000-001/50699>
- Morrow, D. R. (2020): "A Mission-Driven Research Program on Solar Geoengineering Could Promote Justice and Legitimacy." In: *Critical Review of International Social and Political Philosophy*, 23 (5), 618–640.
- Muri, H./Niemeier, U./Kristjánsson, J. E. (2015): "Tropical Rainforest Response to Marine Sky Brightening Climate Engineering: Tropical Forests under Geoengineering." In: *Geophysical Research Letters*, 42 (8), 2951–2960.
- National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine (2021): *Reflecting Sunlight: Recommendations for Solar Geoengineering Research and Research Governance*. Washington, D.C., <https://nap.nationalacademies.org/catalog/25762/reflecting-sunlight-recommendations-for-solar-geoengineering-research-and-research-governance>
- National Academy of Sciences (1992): *Policy Implications of Greenhouse Warming: Mitigation, Adaptation and the Science Base*. Washington, D.C., <https://nap.nationalacademies.org/catalog/1605/policy-implications-of-greenhouse-warming-mitigation-adaptation-and-the-science>
- National Research Council. 2015. *Climate Intervention: Reflecting Sunlight to Cool Earth*. Washington, DC: The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/18988>
- National Research Council (2006): *Geological and geotechnical engineering in the new millennium: opportunities for research and technological innovation*. Washington, D.C.
- Oomen, J. (2021): *Imagining climate engineering: dreaming of the designer climate*. New York: Routledge.
- Oomen, J./Meiske, M. (2021): *Proactive and reactive geoengineering: Engineering the climate and the lithosphere*. In: *WIREs Climate Change*, 12 (6), e732.
- OSTP (The White House 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, D.C., USA., <https://www.whitehouse.gov/wp-content/uploads/2023/06/Congressionally-Mandated-Report-on-Solar-Radiation-Modification.pdf>
- Parkes, B./Challinor, A./Nicklin, K. (2015): "Crop Failure Rates in a Geoengineered Climate: Impact of Climate Change and Marine Cloud Brightening." In: *Environmental Research Letters*, 10 (8), 084003.
- Ridgwell, A./Singarayer, J. S./Hetherington, A. M./Valdes, P. J. (2009): "Tackling Regional Climate Change By Leaf Albedo Bio-geoengineering." In: *Current Biology*, 19 (2), 146–150.

Robock, A. (Feb 17, 2015). The CIA asked me about controlling the climate – this is why we should worry. The Guardian, <https://www.theguardian.com/commentisfree/2015/feb/17/cia-controlling-climate-geoengineering-climate-change>

Royal Society (2009): Geoengineering the climate: Science, governance and uncertainty. London, <https://royalsociety.org/-/media/policy/publications/2009/8693.pdf>

Schneider, T./Kaul, C. M./Pressel, K. G. (2020): "Solar Geoengineering May Not Prevent Strong Warming from Direct Effects of CO₂ on Stratocumulus Cloud Cover." In: Proceedings of the National Academy of Sciences, 117 (48), 30179–30185.

Stephens, J. C./Kashwan, P./McLaren, D./Surprise, K. (2021): The Dangers of Mainstreaming Solar Geoengineering: A critique of the National Academies Report. In: Environmental Politics, 32 (1), 157-166.

Stigebrandt, A./Liljebladh, B./de Brabandere, L./Forth, M./Granmo, Å./Hall, P./Hammar, J./Hansson, D./Kononets, M./Magnusson, M./Norén, F./Rahm, L./Treusch, A. H./Viktorsson, L. (2015): "An Experiment with Forced Oxygenation of the Deepwater of the Anoxic By Fjord, Western Sweden." In: AMBIO, 44 (1), 42–54.

Stjern, C. W./Muri, H./Ahlm, L./Boucher, O./Cole, J. N. S./Ji, D./Jones, A./Haywood, J./Kravitz, B./Lenton, A./Moore, J. C./Niemeier, U./Phipps, S. J./Schmidt, H./Watanabe, S./Kristjánsson, J. E. (2017): Response to marine cloud brightening in a multi-model ensemble. <https://acp.copernicus.org/articles/18/621/2018/>

Surprise, K. (2022): Whose climate intervention? Solar geoengineering, fractions of capital, and hegemonic strategy. In: Capital & Class, 47 (4), 539-564.

Szerszynski, B./Kearnes, M./Macnaghten, P./Owen, R./Stilgoe, J. (2013): "Why Solar Radiation Management Geoengineering and Democracy Won't Mix." In: Environment and Planning A: Economy and Space, 45 (12), 2809–2816.

The White House (1965): Restoring the Quality of Our Environment. Washington, D.C.

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./Rasch, P. J./Singh, B./Yoon, J.-H./Niemeier, U./Schmidt, H./Robock, A./Yang, S./Watanabe, S. (2013): "The hydrological impact of geoengineering in the Geoengineering Model Intercomparison Project (GeoMIP)." In: Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 118 (19), 11,036-11,058.

Tilmes, S./Richter, J. H./Kravitz, B./MacMartin, D. G./Glanville, A. S./Vioni, D./Kinnison, D. E./Müller, R. (2021): "Sensitivity of Total Column Ozone to Stratospheric Sulfur Injection Strategies." In: Geophysical Research Letters, 48 (19), e2021GL094058.

Tilmes, S./Vioni, D./Jones, A./Haywood, J./Séférian, R./Nabat, P./Boucher, O./Bednarz, E. M./Niemeier, U. (2022): "Stratospheric ozone response to sulfate aerosol and solar dimming climate interventions based on the G6 Geoengineering Model Intercomparison Project (GeoMIP) simulations." In: Atmospheric Chemistry and Physics, 22 (7), 4557–4579.

Trisos, C. H./Amatulli, G./Gurevitch, J./Robock, A./Xia, L./Zambri, B. (2018a): "Potentially dangerous consequences for biodiversity of solar geoengineering implementation and termination." In: Nature Ecology & Evolution, 2 (3), 475–482.

Trisos, C. H./Gabriel, C./Robock, A./Xia, L. (2018b): Ecological, Agricultural, and Health Impacts of Solar Geoengineering. In: Zommers, Z./Alverson, K. (Eds.): Resilience: The Science of Adaptation to Climate Change, London: Elsevier, 291–303.

Tsipiras, K./Grant, W. J. (2022): "What do we mean when we talk about the moral hazard of geoengineering?" In: Environmental Law Review, 24 (1), 27–44.

Umweltbundesamt (2011): Geo-Engineering: wirksamer Klimaschutz oder Größenwahn?, <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/geo-engineering-wirksamer-klimaschutz-groessenwahn>

United Nations Environment Programme (2023): One Atmosphere: An independent expert review on Solar Radiation Modification research and deployment. Nairobi, Kenya, <https://www.unep.org/resources/report/Solar-Radiation-Modification-research-deployment>

Visioni, D./MacMartin, D. G./Kravitz, B./Richter, J. H./Tilmes, S./Mills, M. J. (2020): "Seasonally Modulated Stratospheric Aerosol Geoengineering Alters the Climate Outcomes." In: *Geophysical Research Letters*, 47 (12), e2020GL088337.

Visioni, D./Pitari, G./Tuccella, P./Curci, G. (2018): "Sulfur deposition changes under sulfate geoengineering conditions: quasi-biennial oscillation effects on the transport and lifetime of stratospheric aerosols." In: *Atmospheric Chemistry and Physics*, 18 (4), 2787–2808.

Wagner, G. (2021): *Geoengineering: The Gamble*. Cambridge, UK; Medford, MA: Polity Press.

Williamson, P./Bodley, R. (2016): *Update on Climate Geoengineering in Relation to the Convention on Biological Diversity: Potential Impacts and Regulatory Framework*. Montreal, Secretariat of the Convention on Biological Diversity.

Zarnetske, P. L./Gurevitch, J./Franklin, J./Groffman, P. M./Harrison, C. S./Hellmann, J. J./Hoffman, F. M./Kothari, S./Robock, A./Tilmes, S./Visioni, D./Wu, J./Xia, L./Yang, C.-E. (2021): "Potential ecological impacts of climate intervention by reflecting sunlight to cool Earth." In: *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 118 (15), e1921854118.

Zhao, M./Cao, L./Bala, G./Duan, L. (2021): "Climate Response to Latitudinal and Altitudinal Distribution of Stratospheric Sulfate Aerosols." In: *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 126 (24), e2021JD035379.

A Anhang

A.1 Tagesordnung des Expert*innengesprächs zur Stratosphärischen Aerosol-Injektion, 15. September 2022 (online)

In den vergangenen Jahren haben sich die Diskussionen über Geoengineering, also großangelegte Eingriffe in planetare Systeme zur Bekämpfung des Klimawandels, deutlich intensiviert. Geoengineering umfasst sowohl Technologien zur Entnahme von Kohlendioxid aus der Atmosphäre (Carbon Dioxide Removal, CDR) als auch Technologien, die darauf abzielen, die einfallende Sonnenstrahlung zu reflektieren (Solar Radiation Modification, SRM). Sowohl CDR als auch SRM stehen zunehmend im Fokus der Kritik.

Die entscheidende Frage bei diesen Technologien ist, ob und wie sie in wirksame, gerechte und nachhaltige Klimamaßnahmen integriert werden können. Welche Formen des Geoengineerings können einen bewohnbaren Planeten sichern? Wie können sie auf nachhaltige Weise eingesetzt werden? Lassen sich solche Technologien sicher, effektiv und gerecht steuern? Welche Risiken bergen diese Technologien, sowohl physikalisch als auch politisch?

In diesem Expert*innengespräch möchten wir die potenziellen Risiken und Vorteile der Stratosphärischen Aerosol-Injektion (SAI) überwiegend aus technologischer und naturwissenschaftlicher Perspektive diskutieren. Welche möglichen Risiken und Vorteile birgt SAI? Sollte SAI überhaupt erforscht werden? Welches Maß an Sicherheit können wir hinsichtlich der Auswirkungen von SAI erreichen? Wie könnte SAI reguliert werden? Könnte SRM eine Rolle in einer effektiven, gerechten und nachhaltigen Klimapolitiken spielen?

Mit Beiträgen seitens:

- ▶ Dr. Claudia Wieners
- ▶ Dr. Wilfried Rickels
- ▶ Dr. Ulrike Niemeier
- ▶ Dr. Hauke Schmidt
- ▶ Dr. Babatunde J. Abiodun
- ▶ Dr. Simone Tilmes
- ▶ Dr. Dhanasree Jayaram

A.1.1 Sitzung 1 – Was ist SAI? Die Frage des Globalen Thermostats. 9:30 – 10:45 Uhr

*In dieser ersten Sitzung werden wir erörtern, was stratosphärische Aerosol-Injektion (SAI) ist, welche wesentlichen Chancen und Risiken sie mit sich bringt und wie sie mit der zentralen Herausforderung des anthropogenen Klimawandels (Temperatur) zusammenhängt. Durch die Beiträge von Claudia Wieners und Wilfried Rickels werden wir sowohl diskutieren, warum Wissenschaftler*innen annehmen, dass SAI möglicherweise unvermeidbar ist, als auch, warum es unwahrscheinlich ist, dass eine Einigung darüber erzielt werden kann, wie SAI angewendet werden sollte.*

- ▶ Eröffnung durch Dr. Jeroen Oomen, Vorstellungsrunde

- ▶ Dr. Claudia Wieners (Universität Utrecht): “Solar Radiation Management: What is it, can we do it, can we do without?”
- ▶ Dr. Wilfried Rickels (Kiel Institut für Weltwirtschaft): “Incentives for Solar Geoengineering Deployment. Who turns the global thermostat and by how much?”
- ▶ Freie Diskussion zwischen allen Teilnehmer*innen und allen eingeladenen Expert*innen (moderiert durch Jeroen Oomen)

A.1.2 Sitzung 2 – Was können wir über SAI wissen? 11:15 – 12:30 Uhr

In der zweiten Sitzung wenden wir uns einer zentralen Frage in Bezug auf SAI zu: Wie wissen wir, was wir wissen? Und können wir dem, was wir wissen, vertrauen? Können wir in irgendeiner Form Sicherheit über die Auswirkungen von SAI erreichen? Darüber, wie sie mit dem Klimawandel insgesamt interagiert? Die Präsentationen von Ulrike Niemeier und Hauke Schmidt werden solche Fragen aufwerfen und dabei speziell auf Klimasimulationen durch Modelle eingehen.

- ▶ Dr. Ulrike Niemeier (Max-Planck-Institut für Meteorologie, Deutschland): “Uncertainties in the simulation of transport and aerosol formation in the stratosphere”
- ▶ Dr. Hauke Schmidt (Max-Planck-Institut für Meteorologie, Deutschland): “Uncertainties in the simulation of climate effects of SAI”
- ▶ Freie Diskussion zwischen allen Teilnehmer*innen und allen eingeladenen Expert*innen (moderiert durch Jeroen Oomen)

A.1.3 Sitzung 3 – Was haben wir bereits über SAI verstanden? 14:00 – 15:15 Uhr

In der dritten Sitzung richten wir den Fokus darauf, was wir über SAI wissen und was wir im letzten Jahrzehnt der Forschung gelernt haben. Simone Tilmes wird über den aktuellen Stand der Forschung und die großen Herausforderungen im Zusammenhang mit SAI sprechen. Anschließend wird Babatunde Abiodun eine schwierige Frage im Zusammenhang mit SAI erörtern: Welche regionalen Auswirkungen wird SAI haben? Und wie sollten wir mit diesen umgehen?

- ▶ Dr. Simone Tilmes (National Center for Atmospheric Research, USA): “Current research and challenges of Stratospheric Climate Interventions”
- ▶ Dr. Babatunde J. Abiodun (University of Capetown, South Africa): “Potential impacts of stratospheric aerosol injection on drought risk managements over major river basins in Africa”
- ▶ Freie Diskussion zwischen allen Teilnehmer*innen und allen eingeladenen Expert*innen (moderiert durch Jeroen Oomen)

A.1.4 Sitzung 4 – Was sollen wir zu SAI unternehmen? Implikationen für das UBA. 15:45 – 17:00 Uhr

Die abschließende Sitzung wird eine offene Diskussion zwischen allen Anwesenden darüber umfassen, welche Bedeutung der Stand der SAI-Forschung für die Position des Umweltbundesamtes hat. Wie passt SAI in die Klimapolitik insgesamt? Kann es jemals in Erwägung gezogen werden? Könnte es reguliert werden? Besonders interessant in dieser Diskussion ist, wie SAI mit anderen

wichtigen politischen Zielen der internationalen Politik, wie den SDGs, interagieren könnte. Dies wirft Fragen nach geopolitischen Spannungen, möglichen regionalen Schäden und dem Risiko auf, dass die SAI-Forschung die Emissionsminderung behindert.

Diese Sitzung wird eine von Jeroen Oomen moderierte Diskussion umfassen, in welcher alle UBA-Teilnehmer*innen ihre im Laufe des Tages entstandenen Fragen anbringen können.

Allgemeiner Abschluss, Abschlussworte durch Jens Tambke & Jeroen Oomen.

A.2 Tagesordnung des Expert*innengesprächs zu Solar Radiation Modification, 19. Oktober 2022 (online)

In den vergangenen Jahren haben sich die Diskussionen über Geoengineering, also großangelegte Eingriffe in planetare Systeme zur Bekämpfung des Klimawandels, deutlich intensiviert. Geoengineering umfasst sowohl Technologien zur Entnahme von Kohlendioxid aus der Atmosphäre (Carbon Dioxide Removal, CDR) als auch Technologien, die darauf abzielen, die einfallende Sonnenstrahlung zu reflektieren (Solar Radiation Modification, SRM). Sowohl CDR als auch SRM stehen zunehmend im Fokus der Kritik.

Die entscheidende Frage bei diesen Technologien ist, ob und wie sie in wirksame, gerechte und nachhaltige Klimamaßnahmen integriert werden können. Welche Formen des Geoengineerings können einen bewohnbaren Planeten sichern? Wie können sie auf nachhaltige Weise eingesetzt werden? Lassen sich solche Technologien sicher, effektiv und gerecht steuern? Welche Risiken bergen diese Technologien, sowohl physikalisch als auch politisch?

In diesem Expert*innengespräch möchten wir die potenziellen Risiken und Vorteile der Solar Radiation Modification (SRM) überwiegend aus technologischer und naturwissenschaftlicher Perspektive diskutieren. Welche möglichen Risiken und Vorteile birgt SRM? Sollte SRM überhaupt erforscht werden? Welches Maß an Sicherheit können wir hinsichtlich der Auswirkungen von SAI erreichen? Wie könnte SRM reguliert werden? Könnte SRM eine Rolle in einer effektiven, gerechten und nachhaltigen Klimapolitiken spielen?

Mit Beiträgen seitens:

- ▶ Prof. Dr. Herman Russchenberg
- ▶ Dr. Shaun Fitzgerald
- ▶ Prof. Dr. Ulrike Lohmann
- ▶ Dr. Julia Crooks
- ▶ Dr. Cheryl Harrison
- ▶ Dr. Kelsey Roberts
- ▶ Dr. Jonathan Proctor

Morgensitzungen: SRM-Technologien

In diesen ersten Morgensitzungen betrachten wir mehrere SRM-Technologien aus wissenschaftlicher Perspektive. Eine davon, die Aufhellung von Meereswolken (Marine Cloud Brightening, MCB), wird intensiv als potenzielle SRM-Methode erforscht, und es gibt einen aufkommenden Konsens, dass sie technologisch zur Abkühlung des Klimas beitragen könnte. Die

beiden anderen zu diskutierenden Technologien, die Verdünnung von Zirruswolken (Cirrus Cloud Thinning, CCT) und die Modifikation der Ozeanalbedo durch Mikrobläschen, sind ungewisser. Es gibt kein breites Forschungsfeld zu diesen Technologien, doch es existieren theoretische Überlegungen zu ihren möglichen Funktionsweisen.

A.2.1 Sitzung 1 – Marine Cloud Brightening. 9:30 – 10:45 Uhr

In dieser ersten Sitzung werden wir eine der beiden am intensivsten erforschten SRM-Methoden diskutieren: die Aufhellung von Meereswolken (Marine Cloud Brightening, MCB). Neben der stratosphärischen Aerosol-Injektion ist MCB die am besten erforschte potenzielle SRM-Intervention. Derzeit wird untersucht, ob und wie MCB funktionieren könnte, welche Hauptrisiken damit verbunden sind und was wir durch die Forschung über MCB wissen können und was nicht.

- ▶ Eröffnung durch Dr. Jeroen Oomen, Vorstellungsrunde
- ▶ Prof. Dr. Herman Russchenberg: “Marine Cloud Brightening: What is it? What can it do? What can it not do? What are its risks?”
- ▶ Dr. Shaun Fitzgerald: “Marine Cloud Brightening: How would it work, technically? What is the engineering challenge, and what research would be needed?”
- ▶ Freie Diskussion zwischen allen Teilnehmer*innen und allen eingeladenen Expert*innen (moderiert durch Jeroen Oomen)

A.2.2 Sitzung 2 – Cirrus Cloud Thinning und Erhöhung der Ozeanalbedo. 11:15 – 12:30 Uhr

In der zweiten Sitzung wenden wir uns zwei ungewisseren SRM-Methoden zu: der Verdünnung von Zirruswolken (CCT) und der Modifikation der Ozeanalbedo. Auch hier konzentrieren wir uns auf die grundlegenden Prinzipien dieser Technologien, ihre möglichen Auswirkungen, ihre mögliche Funktionsweise und die mit den Technologien verbundenen Hauptrisiken.

- ▶ Prof. Dr. Ulrike Lohmann: “Cirrus Cloud Thinning: What is it? What can it do? What can it not do? What are its risks?”
- ▶ Dr. Julia Crook: “Ocean Albedo Modification (Microbubbles): What is it? What can it do? What can it not do? What are its risks?”
- ▶ Freie Diskussion zwischen allen Teilnehmer*innen und allen eingeladenen Expert*innen (moderiert durch Jeroen Oomen)

Nachmittag: Ökologische Auswirkungen und Allgemeine Diskussion

Am Nachmittag lassen wir die technologische Spezifika des Vormittags hinter uns und wenden uns übergreifenden Fragen zu den potenziellen ökologischen Auswirkungen von SRM zu. Wir beleuchten sowohl die Auswirkungen an Land als auch im Meer. Daraufhin führen wir eine abschließende Diskussion über die Konsequenzen für das UBA: Was bedeutet all das?

A.2.3 Sitzung 3 – Was sind die potenziellen ökologischen Auswirkungen von SRM? 14:00 – 15:15 Uhr

*In der dritten Sitzung richten wir den Fokus auf die ökologischen Auswirkungen von SRM. In zwei Präsentationen werden unsere Expert*innen einige zentrale Bedenken und Fragen zu den möglichen Auswirkungen von SRM beleuchten. Zunächst wenden wir uns Kelsey Roberts zu, die uns die Arbeit vorstellen wird, die sie gemeinsam mit Cheryl Harrison und Phoebe Zarnetske zu Aspekten mariner Ökosysteme durchführt. Anschließend wird Jonathan Proctor über die potenziellen Auswirkungen von SRM auf die Landwirtschaft sprechen.*

- ▶ Dr. Kelsey Roberts: Potential Marine Ecosystem impacts connected to SRM
- ▶ Dr. Jonathan Proctor: Potential agricultural impacts connected to SRM
- ▶ Freie Diskussion zwischen allen Teilnehmer*innen und allen eingeladenen Expert*innen (moderiert durch Jeroen Oomen)

A.2.4 Sitzung 4 – Was sollen wir zu SRM unternehmen? Implikationen für das UBA 15:45 – 17:00 Uhr

Die abschließende Sitzung wird eine offene Diskussion zwischen allen Anwesenden darüber sein, welche Bedeutung die Beiträge des Tages zur SRM-Forschung für die Position des Umweltbundesamtes haben. Wie passt SRM in die allgemeine Klimapolitik? Kann es jemals in Betracht gezogen werden? Könnte es reguliert werden? Von besonderem Interesse in dieser Diskussion ist, wie SRM mit anderen wichtigen politischen Zielen der internationalen Politik, wie den SDGs, interagieren könnte. Dies wirft Fragen nach geopolitischen Spannungen, möglichen regionalen Schäden und dem Risiko auf, dass durch die SRM-Forschung die Emissionsminderung behindert wird.

*Diese Sitzung wird eine von Jeroen Oomen moderierte Diskussion umfassen, in welcher alle UBA-Teilnehmer*innen ihre im Laufe des Tages entstandenen Fragen anbringen können.*

Allgemeiner Abschluss, Abschlussworte durch Jens Tambke & Jeroen Oomen.