

## Grosse Risiken und offene Fragen bei der Veränderung der Sonneneinstrahlung als Klimamassnahme

Technische Methoden, mit denen die Sonneneinstrahlung auf die Erde reduziert wird (Solar Radiation Modification, SRM), sind mit erheblichen, weitgehend unbekanntem Risiken verbunden. Neben spezifischer Forschung zu möglichen Auswirkungen bräuchte es internationale Regelwerke, um bei einem SRM-Einsatz ein weltweit koordiniertes Vorgehen zu ermöglichen und Missbrauch vorzubeugen. Der Einsatz von SRM kann Massnahmen zur Minderung von Treibhausgasen keinesfalls ersetzen.

Das Pariser Klimaabkommen zielt darauf ab, die globale Erwärmung auf deutlich unter zwei Grad Celsius zu begrenzen, möglichst sogar auf 1,5 Grad im Vergleich zur vorindustriellen Zeit.<sup>1</sup> Doch die aktuellen Entwicklungen zeigen, dass sich die Emissionsreduktionen und der Ausbau von CO<sub>2</sub>-Entnahmetechniken zu langsam entwickeln, um die Klimaziele genügend rasch zu erreichen.<sup>2,3</sup>

Die gezielte Veränderung der Sonneneinstrahlung (Solar Radiation Modification, SRM) könnte helfen, die Erwärmung zu reduzieren. Kürzlich erschienene Forschungsberichte dokumentieren den aktuellen Wissensstand zu SRM-Methoden.<sup>3, 4, 5</sup> Das vorliegende Faktenblatt fasst die wichtigsten Inhalte und Erkenntnisse zusammen.

## Wie lässt sich die Sonneneinstrahlung technisch verändern?

SRM zielt darauf ab, die Sonneneinstrahlung auf die Erde mit technischen Massnahmen zu vermindern und so den Anstieg der globalen Durchschnittstemperatur zu reduzieren.<sup>5</sup>

### Verschiedene Methoden

Grundsätzlich werden drei SRM-Methoden diskutiert, die das Ziel haben, die einfallenden kurzwelligeren Sonnenstrahlen ins All zu reflektieren. Je nach Methode geschieht dies auf globaler, regionaler oder lokaler Ebene.<sup>5,6</sup>

**1. Stratosphärische Aerosol-Injektion (Stratospheric Aerosol Injection, SAI):** Aerosole in der Stratosphäre reflektieren das Sonnenlicht. Dadurch gelangt nur ein Teil der Strahlung in die untere Atmosphäre und kann die Erdoberfläche erwärmen. Die Injektion von Schwefeldioxid fördert die Bildung von Aerosolen und verstärkt die Rückstrahlung. Diese Methode wirkt hauptsächlich global.<sup>6</sup>

Ein bekanntes natürliches Beispiel für diesen Effekt sind grosse Vulkanausbrüche wie der Ausbruch des Pinatubos auf den Philippinen im Jahr 1991. Der Vulkan schleuderte grosse Mengen an Schwefeldioxid in die Stratosphäre. Dies hat die globale Durchschnittstemperatur kurzfristig um einige Zehntel Grad reduziert.<sup>6</sup>

**2. Aufhellung mariner Wolken (Marine Cloud Brightening, MCB):** In tiefliegenden Wolken über dem Ozean werden Salzwasserpartikel eingebracht, damit mehr und kleinere Tröpfchen entstehen. Dadurch wird die Wolke heller und mehr Sonnenlicht reflektiert. Diese Methode wirkt hauptsächlich regional.<sup>6</sup>

**3. Erhöhung der Oberflächenalbedo:** Dächer, Strassen oder landwirtschaftliche Nutzflächen werden aufgehellt, um den Anteil des reflektierten Sonnenlichts zu erhöhen. Die Temperaturen der Atmosphäre und des Bodens sinken lokal. Der globale Effekt ist gering. Diese Methode wird vor allem in subtropischen und tropischen Städten seit Jahrhunderten erfolgreich angewandt und mindert hitzebedingte gesundheitliche Beeinträchtigungen und Infrastrukturschäden.<sup>6</sup>

Eine weitere Methode hat zum Ziel, mehr langwellige Infrarotstrahlung (mehr Wärme) ins All entweichen zu lassen:

**4. Ausdünnung von Zirruswolken:** Durch das Einbringen zusätzlicher Eiskeime wird die Anzahl der Zirruswolken und deren Dicke reduziert. Dadurch kann mehr langwellige Infrarotstrahlung von der Erde ins All entweichen, was die Atmosphäre abkühlt.<sup>6</sup>

Daneben gibt es theoretische Überlegungen, die Reflexion von Sonnenlicht mit Weltraumspiegeln zu erhöhen. Allerdings wird diese Technologie noch lange nicht verfügbar sein und wäre sehr teuer.<sup>4</sup>

### Einsatzmöglichkeiten

SRM unterscheidet sich von der CO<sub>2</sub>-Entnahme aus der Atmosphäre (Carbon Dioxide Removal, CDR) in einem wichtigen Punkt: CDR macht den Ausstoss von CO<sub>2</sub> rückgängig und

bekämpft eine Hauptursache des Klimawandels. SRM hingegen verändert die Strahlungsbilanz und versucht, einen Teil der Auswirkungen des Klimawandels – die Temperaturerhöhung – zu dämpfen. Andere Auswirkungen des Klimawandels bleiben bestehen.<sup>5,6</sup>

SRM ist derzeit die einzige Technologie, die – wenn im grossen Massstab eingesetzt – den Anstieg der globalen Durchschnittstemperatur innerhalb weniger Jahre abschwächen könnte.<sup>5,6</sup> Sobald die SRM-Aktivitäten jedoch beendet werden, nimmt die Erwärmung wieder rasch zu, mit weitgehend unerforschten Auswirkungen auf das Erd- und Ökosystem. Eine Minderung der Treibhausgase, zum Beispiel eine Entnahme von CO<sub>2</sub> wirkt sich dagegen erst nach einigen Jahren aus, wirkt aber jahrhundertlang.<sup>5</sup> SRM könnte so die maximale vorübergehende Erwärmung und einige der ökonomischen, ökologischen und sozialen Auswirkungen des Klimawandels temporär reduzieren, und dies zu möglicherweise relativ geringen Kosten. Allenfalls könnte damit auch das Überschreiten klimatischer und ökologischer Kippunkte verhindert werden. Danach könnten die SRM-Massnahmen schrittweise wieder eingestellt werden.<sup>4</sup>

MCB könnte zudem gezielt in verletzlichen Gebieten eingesetzt werden, zum Beispiel in der Arktis oder im Great Barrier Reef.<sup>4</sup>

## Unsicherheiten und Risiken von SRM

Es gibt nur wenige wissenschaftliche Untersuchungen, wie sich SRM-Anwendungen auf Mensch und Umwelt auswirken.<sup>5</sup> SRM wurde bisher vor allem in Klimamodellen untersucht. Diese Modelle sind jedoch noch nicht ausgereift genug, um die Auswirkungen verlässlich abzuschätzen bzw. zu quantifizieren.<sup>4</sup>

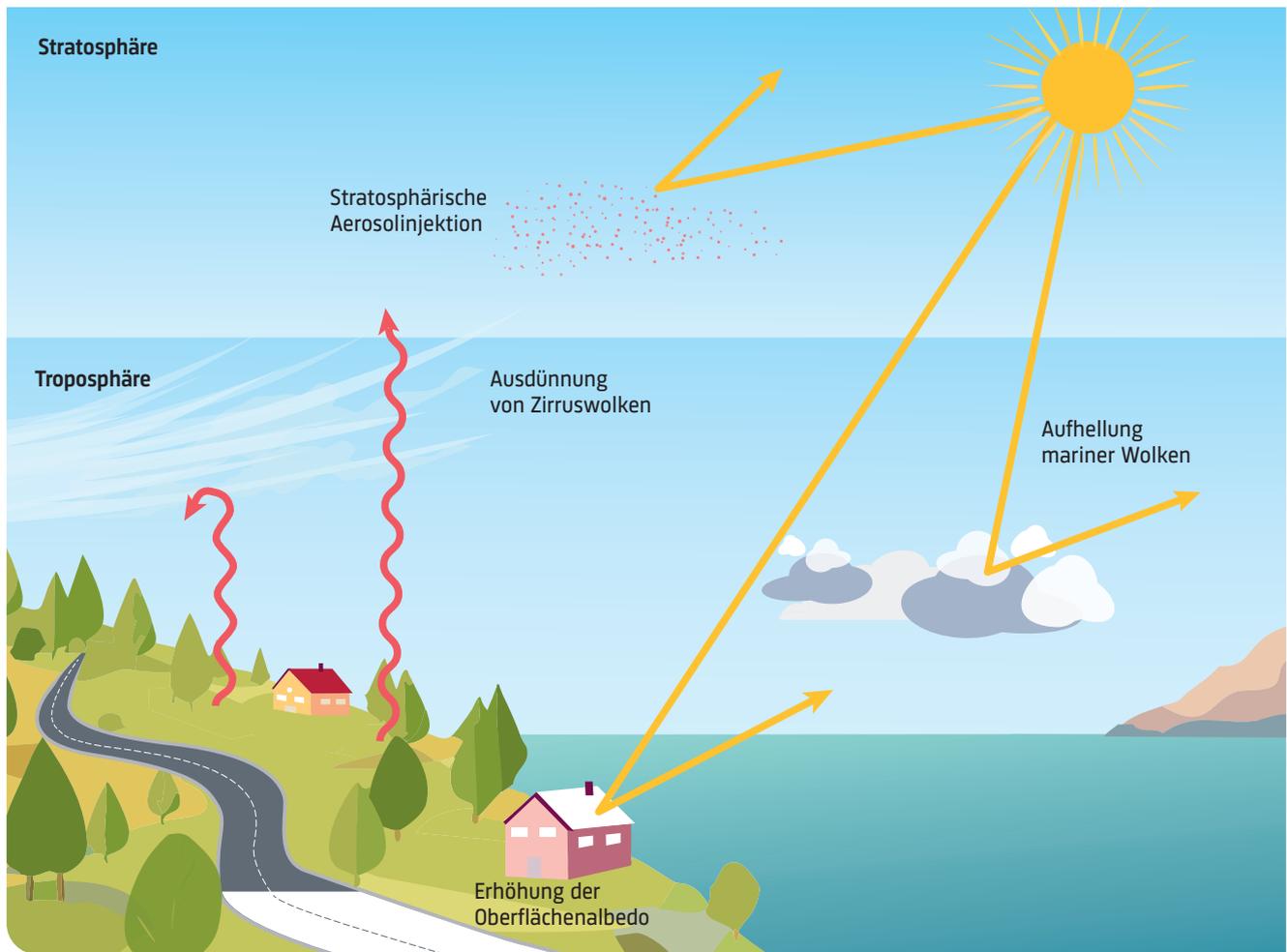
Die verschiedenen positiven und negativen Umweltauswirkungen von SRM sind wie jene des Klimawandels global und regional nicht gleichmässig verteilt. Die Unsicherheiten zu den Folgen sind dementsprechend sehr gross.<sup>5</sup>

Zurzeit fehlt ein internationaler wissenschaftlicher Überprüfungsprozess, um Szenarien, Konsequenzen, Unsicherheiten und Wissenslücken zu SRM zu identifizieren und zu schliessen.<sup>3</sup>

SRM schwächt einige Folgen des Klimawandels nicht ab – wie zum Beispiel die Ozeanversauerung, die durch die hohen Treibhausgasemissionen verursacht wird, und deren negativen Auswirkungen auf die marinen Ökosysteme und die Fischerei.<sup>5,6</sup>

### Umweltrisiken

Die Reaktion des globalen Wasserkreislaufs auf SRM ist noch mit grossen Unsicherheiten behaftet. Es besteht das Risiko, dass sich Niederschlagsmuster in unerwünschter Weise verändern, was gravierende Folgen für Natur und Gesellschaft haben könnte. Die Wechselwirkungen zwischen Wolken, Aerosolen und Strahlung bei SRM durch Beeinflussung der Wolkenbildung sind noch ungenügend verstanden. So können nicht-lineare Veränderungen auf regionaler Ebene



Die stratosphärische Aerosolinjektion, die Aufhellung mariner Wolken und die Erhöhung der Oberflächenalbedo haben das Ziel, die einfallenden kurzwelligen Sonnenstrahlen ins All zu reflektieren. Durch die Ausdünnung von Zirruswolken sollten mehr langwellige Infrarotstrahlung von der Erde ins All entweichen.

beispielsweise aufgrund von Änderungen der Verdunstung nicht ausgeschlossen werden.<sup>7</sup> Zudem könnte der globale Einsatz von SAI die Tropen stärker abkühlen als die Polarregionen.<sup>3</sup>

Die globalen Temperaturgradienten könnten sich verschieben, was direkten Einfluss auf die Atmosphärenzirkulation und Wettersysteme haben würde.<sup>3</sup> SAI-Einsätze könnten die Temperaturunterschiede zwischen der Nord- und Südhalbkugel vergrößern und zum Beispiel tropische Monsun-Niederschläge verändern oder Hurrikane im Nordatlantik verstärken.<sup>5</sup>

Der Einsatz von SRM hat möglicherweise direkte und unbeabsichtigte negative Folgen für die Umwelt. So könnte beispielsweise die stratosphärische Ozonschicht beschädigt oder die Schliessung des Ozonlochs verzögert werden.<sup>3</sup>

Die durch SRM freigesetzten Aerosole verbleiben bei SAI nur ein bis drei Jahre in der Stratosphäre und bei MCB sogar nur etwa zehn Tage in der Troposphäre. Um die globale Durchschnittstemperatur zu senken, müssten SRM-Aktivitäten deshalb dauerhaft aufrecht erhalten werden.<sup>5</sup> Werden SRM-Massnahmen plötzlich beendet, erwärmt sich die Atmosphäre sehr rasch und die globalen und regionalen Wasserkreisläufe können sich insbesondere in tropischen

Regionen abrupt verändern, was die Auswirkungen des Klimawandels auf Ökosysteme und Umwelt noch verschlimmern würde.<sup>7</sup>

#### (Geo-)Politische Risiken

SRM kann als vermeintlich schnelle Lösung die politischen Bemühungen und die gesellschaftliche Bereitschaft zur Emissionsminderung untergraben.<sup>4</sup>

SRM spielt in der öffentlichen Wahrnehmung bisher eine geringe Rolle. Es ist unklar, ob die Gesellschaft solche Massnahmen überhaupt akzeptieren würde.<sup>4</sup>

Es fehlt eine globale Koordination des Einsatzes von SRM. Es gibt keine Gouvernanz bzw. globale Regelungen, um Entscheidungen über den SRM-Einsatz zu fällen sowie Normen und Gesetze festzulegen.<sup>3</sup>

Selbst ein kleinräumiger Einsatz von SRM kann globale Auswirkungen haben. Regionale Gemeinschaften, Nationen und Gesellschaften, die gegen den Einsatz von SRM sind, wären deshalb unter Umständen dennoch betroffen. Das wirft ethische und rechtliche Fragen auf.<sup>5</sup>

SRM bringt erhebliche politische, sicherheits- und geopolitische Herausforderungen mit sich. Es besteht die Gefahr,

dass es zu Machtkämpfen zwischen Ländern kommt oder die Technologie für militärische Zwecke missbraucht wird.<sup>4</sup>

Der unkoordinierte Einsatz von SRM auf lokaler Ebene kann sich negativ auf andere Regionen auswirken. Es könnten Konflikte über die Verantwortung für regionale klimatische Veränderungen entstehen, selbst wenn kein direkter Zusammenhang zwischen Wetterphänomenen und möglichem SRM-Einsatz besteht.<sup>3, 4, 5</sup>

### Wirtschaftliche Risiken

Die direkten Kosten der Verwendung von SRM – ohne Berücksichtigung möglicher negativer Auswirkungen – für eine Abkühlung um ein Grad Celsius werden auf mehrere zehn Milliarden US-Dollar pro Jahr geschätzt.<sup>5</sup> Es ist unklar, wer diese Kosten sowie die zusätzlichen Kosten für allfällige negative Wirkungen übernehmen würde.<sup>5</sup>

## Wichtigste Erkenntnisse und Handlungsoptionen

Angesichts der bestehenden Risiken und grossen Unsicherheiten scheint es noch zu früh, um SRM-Tests oder sogar Einsätze zu erwägen. Zuerst sollte die Erforschung in Klimamodellen sowie die Entwicklung internationaler Regelwerke vorangetrieben werden.

Eine internationale Abstimmung zur Erforschung und Einsatz von SRM scheint nötig und zielführend. Die Erarbeitung von klaren Regelungen könnte unkoordinierte und riskante Alleingänge verhindern oder zumindest minimieren sowie klimatische und geopolitische Risiken und unerwünschte Nebenwirkungen eindämmen. Eine solche internationale Gouvernanz sollte die Grundlage sein, auf welcher der Einsatz von SRM verhandelt wird sowie Einsatzstrategien und Regelwerke aufgestellt werden.

Es braucht spezifische Forschung zu SRM, um die bestehenden Unsicherheiten und Risiken möglichst zu reduzieren. Dabei empfiehlt sich die Einrichtung eines internationalen wissenschaftlichen Überprüfungsprozesses, um Szenarien, Folgen, Unsicherheiten und Wissenslücken koordiniert zu identifizieren und zu schliessen.

Nicht nur der Einsatz von SRM birgt Risiken, sondern auch das Fortschreiten des Klimawandels. Bei einem ungenügenden Klimaschutz braucht es deshalb allenfalls eine Abwägung zwischen den Risiken von SRM und jenen einer unverminderten Erwärmung.

SRM kann eine Treibhausgasreduktion nicht ersetzen. Die Emissionsreduktion und die Entnahme von CO<sub>2</sub> müssen weiterhin im Vordergrund eines effektiven Klimaschutzes stehen.<sup>8</sup>

### SDGs: Die internationalen Nachhaltigkeitsziele der UNO

Mit dieser Publikation leistet die Akademie der Naturwissenschaften Schweiz einen Beitrag zu SDG 13: «Umgehend Massnahmen zur Bekämpfung des Klimawandels und seiner Auswirkungen ergreifen».

> [sustainabledevelopment.un.org](https://sustainabledevelopment.un.org)  
> [eda.admin.ch/agenda2030/de/home.html](https://eda.admin.ch/agenda2030/de/home.html)



### IMPRESSUM

#### HERAUSGEBERIN UND KONTAKT

Akademie der Naturwissenschaften Schweiz (SCNAT)  
ProClim – Forum für Klima und globalen Wandel  
Haus der Akademien · Laupenstrasse 7 · Postfach · 3001 Bern · Schweiz  
+41 31 306 93 50 · [proclim@scnat.ch](mailto:proclim@scnat.ch) · [proclim.scnat.ch](http://proclim.scnat.ch) X @scnatCH

#### ZITIERVORSCHLAG

Marty S, Neu U et al. (2024) Grosse Risiken und offene Fragen bei der Veränderung der Sonneneinstrahlung als Klimamassnahme. Swiss Academies Factsheets 19 (2)

#### AUTOR

Severin Marty (SCNAT)

#### EDITOR

Urs Neu (SCNAT)

#### BEITRAGENDE

Markus Ammann (Paul Scherrer Institut) · Gabriel Chiodo (ETH Zürich) · Reto Knutti (ETH Zürich) · Ulrike Lohmann (ETH Zürich) · Thomas Peter (ETH Zürich) · Axel Michaelowa (Universität Zürich) · Johannes Sutter (Universität Bern) · Sandro Vattioni (ETH Zürich) · Ivo Wallimann-Helmer (Universität Freiburg)

#### VERANTWORTLICHES FACHGREMIIUM

Kuratorium ProClim

#### REDAKTION

Andres Jordi (SCNAT)

#### LAYOUT UND GRAFIK

Olivia Zwygart (SCNAT)

#### TITELBILD

freestockgallery.de

ISSN (online): 2297-1599

DOI: 10.5281/zenodo.14013169



## Literaturverzeichnis

- 1 United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) (2016) **The Paris Agreement**. Bonn.
- 2 IPCC (2021) **Summary for Policymakers**. In Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (eds. Masson-Delmotte V et al.) Cambridge University Press.
- 3 United Nations Environment Program (UNEP) (2023) **One Atmosphere. An independent expert review on Solar Radiation Modification research and deployment**. Kenya, Nairobi.
- 4 SAPEA (2024) **Evidence Review Report. Solar Radiation Modification**. Berlin.
- 5 United Nations Environment Program (UNEP) (2024) **Navigating New Horizons: A global foresight report on planetary health and human wellbeing**. Nairobi.
- 6 Lee JY, Marotzke J, Bala G, Cao L, Corti S, Dunne, JP, Zhou T et al. (2021) **Future global climate: scenario-based projections and near-term information**. In Climate change 2021: The physical science basis. Contribution of working group I to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change (pp. 553–672). Cambridge University Press.
- 7 Arias P, Bellouin N, Coppola E, Jones R, Krinner G, Marotzke J, Zickfeld K et al. (2021) **Climate Change 2021: the physical science basis**. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change; technical summary.
- 8 Akademien der Wissenschaften Schweiz (2018) **Emissionen rückgängig machen oder die Sonneneinstrahlung beeinflussen. Ist «Geoengineering» sinnvoll, überhaupt machbar und, wenn ja, zu welchem Preis?** Swiss Academies Factsheets 13 (4).