

8.5 Climate-Engineering: Ein Wundermittel gegen den Klimawandel?

ULRIKE NIEMEIER

Climate-Engineering: Ein Wundermittel gegen den Klimawandel? Den Klimawandel auf 1,5 °C Temperaturanstieg zu begrenzen erfordert eine starke Reduzierung der Treibhausgasemissionen und Techniken, um der Atmosphäre Kohlendioxid zu entziehen. Beide Ziele sind schwer zu erreichen. Dieses erhöht den Ruf nach Alternativen, um die schlimmsten Auswirkungen des Klimawandels zu begrenzen. Ein Gedanke ist die künstliche Verringerung des auf die Erdoberfläche treffenden Sonnenlichtes. Vor- und Nachteile einer möglichen Klimasteuerung durch künstliche Eingriffe in den Strahlungshaushalt der Erde werden zusammengefasst dargestellt.

Climate-Engineering: A miracle against climate change? Limiting the global temperature increase to 1.5 °C will require substantial greenhouse gas emission reductions together with large-scale use of capturing carbon dioxide from the air. It remains unclear how this can be achieved. Together with limited commitment for sufficient mitigation efforts this has intensified calls for options that may help to reduce the worst climate effects. One suggested approach is the artificial reduction of sunlight reaching Earth's surface by increasing the reflectivity of Earth's surface or atmosphere. The text summarizes benefits and side effects of this approach.

Was ist Climate-Engineering?

Das Klimaabkommen von Paris hat zum Ziel, den Temperaturanstieg durch Klimawandel auf 1,5 °C über dem vorindustriellen Wert zu begrenzen. Um dieses Ziel zu erreichen müssen Treibhausgasemissionen deutlich abnehmen und Nullemissionen angestrebt werden (MILLAR et al. 2017), bis hin zu negativen Emissionen, also dem Entzug von Kohlendioxid (CO₂) aus der Atmosphäre. Wie aktuelle Diskussionen um die deutschen Klimaziele für das Jahr 2020 zeigen, bestehen weiterhin große Schwierigkeiten bei der Verringerung klimarelevanter Emissionen. All dieses verstärkt die Diskussion um ein Thema, welches der Nobelpreisträger Paul Crutzen 2006 mit einem Artikel (CRUTZEN 2006) wiederbelebt hatte: Climate-Engineering. Darunter versteht man den absichtlichen Eingriff in das Klima, um einen Temperaturanstieg abzumildern. Climate-Engineering ist der Oberbegriff für zwei Technologien: i) CO₂ wird der Atmosphäre entzogen (*carbon dioxide capture*, CDR), ii) Strahlungsmanagement (*solar radiation management*, SRM), bei dem durch absichtliche Eingriffe in den Strahlungshaushalt der Erde der Strahlungsantrieb (Summe zwischen solarer und terrestrischer Strahlung am Oberrand der Atmosphäre), durch Treibhausgase ausgeglichen werden soll. Das Ziel ist eine Reduzierung der Temperatur am Erdboden. Beide Methoden sind sehr umstritten. Im Text sollen einige Vor- und Nachteile aufgezeigt werden, besonders für die SRM-Technologien.

»Carbon dioxide capture« (CDR)

Methoden und Technologien, mit denen größere Mengen CO₂ aus der Atmosphäre entfernt werden könnten (*carbon dioxide capture*, CDR), sind noch nicht in großem Stil umsetzbar (ANDERSON & PETERS 2016). Auch ist unklar, wo und wie dieses CO₂ gespeichert werden kann. Als wirklich sichere Speicher kommen

eigentlich nur erschöpfte Öl- und Gasvorkommen in Frage, doch reicht deren Kapazität nicht aus, um ausreichend CO₂ zu lagern (SCOTT et al. 2015). Alle weiteren Speicher sind entweder nicht erkundet oder es besteht die Gefahr von Leckagen. Die Gewinnung von Bioenergie durch Aufforstung und anschließende Verbrennung, bei der man freiwerdendes CO₂ auffängt (*Bio energy with carbon capture and storage*, BECCS), eine sehr positiv besetzte *Climate-Engineering-Methode*, stößt ebenfalls durch großen Flächenverbrauch und fehlende Speicherkapazitäten schnell an Grenzen. Eine Temperaturreduktion von 0,5 °C mit BECCS erfordert nach einer Studie von BOYSEN et al. (2017) eine Aufforstung auf einem Viertel der weltweit landwirtschaftlich genutzten Flächen oder auf einem Fünftel der bisherigen Naturflächen. Eine Folge wäre eine zu geringe Lebensmittelproduktion.

»Solar radiation management« (SRM)

Eingriffe in den Strahlungshaushalt der Erde lassen sich leicht erreichen, z.B. durch Weiß-Streichen aller Dächer (Abkühlung) oder durch großflächige Anpflanzung von Bäumen in den hohen Breiten (Erwärmung). Es gibt aber Ansätze mit größeren Auswirkungen:

- i) Der Nobelpreisträger Paul Crutzen griff die Idee auf, mit Hilfe einer künstlichen Schicht von Sulfataerosolen dem Klimawandel entgegenzuwirken. Schwefelinjektionen in die Stratosphäre (*stratospheric aerosol modification*, SAM) bilden eine künstliche Sulfataerosolschicht. Sulfat streut Sonnenlicht und verringert die Intensität des den Boden erreichenden Sonnenlichts. Gleichzeitig absorbiert Sulfat aber terrestrische Strahlung, wodurch sich die Sulfatschicht erwärmt. Diese Methode folgt dem natürlichen Beispiel der Abkühlung nach einer starken Vulkaneruption (siehe Kap. LÜHR & TIMMRECK - Abb. 6.4-1).

- ii) Zur Aufhellung maritimer Stratocumuluswolken (maritime cloud brightening) werden diese über den Meeren künstlich mit Seesalz geimpft, was die Zahl der Wolkentröpfchen erhöht. Dadurch wird diese Wolke heller und reflektiert mehr Sonnenstrahlung zurück in den Weltraum (LATHAM et al. 2008).
- iii) Impfen von Zirruswolken mit Aerosolen. Das künstliche Einbringen zusätzlicher Aerosole führt zu größeren Eiskristallen. Diese sinken ab, wodurch sich die Lebenszeit des Zirrus und auch dessen Entstehungshöhe verringern (LOHMANN & GASPARINI 2017). Zirren tragen zur Erwärmung der Erde bei. Mit einer kürzeren Lebenszeit könnte mehr terrestrische Strahlung in den Weltraum entweichen.

Naturwissenschaftliche Konsequenzen der »Stratospheric aerosol modification« (SAM)

Keiner dieser Ansätze wurde bisher in der Realität getestet und Wissenschaftler begannen erst vor wenigen Jahren, die Risiken und möglichen Nutzen abzuschätzen (ROBOCK 2016). Die Aus- und Nebenwirkungen wurden ausschließlich mit numerischen Erdsystemmodellen modelliert. Mit diesen wurden idealisierte Szenarien gerechnet, in denen z.B. versucht wurde, die zunehmende Erwärmung durch CO₂ zwischen den Jahren 2020 und 2070 mit stratosphärischen Schwefelinjektionen auszugleichen und so das mittlere Klima des Zeitraums um 2020 zu erhalten. Ergebnisse verschiedener Modelle deuten an, dass durch SAM der Temperaturanstieg abgemildert und die Häufigkeit von Extremereignissen verringert wird. Die Ergebnisse des Geoengineering-Modellvergleichs (GeoMIP) zeigen aber auch Nebenwirkungen auf: Durch die verringerte solare Einstrahlung reduziert sich die Verdunstung und damit der Niederschlag im globalen Mittel gegenüber dem mittleren Niederschlag des Klimas um 2020. Gleichzeitig sind Niederschläge regional sehr variabel, wodurch die Gefahr von Überflutungen und Dürren weiter gegeben ist. Durch den langsameren hydrologischen Kreislauf verringert sich die Verfügbarkeit von Wasser in vielen Regionen der Welt, auch der Monsunregen nimmt ab (TILMES et al. 2013). Im Gegensatz dazu verstärkt sich in Modellergebnissen der Monsun durch Impfen von maritimen Wolken bei gleichzeitig noch stärker abnehmendem globalen Niederschlag als unter SAM (NIEMEIER et al. 2013). Das Impfen von Zirruswolken könnte den durchschnittlichen globalen Niederschlag sogar erhöhen, was auch zu einer Verstärkung von Starkniederschlägen und des Monsuns führen könnte. Die großen Überschwemmungen der vergangenen Jahre durch starken Monsunregen in Asien machen diese Problematik sehr deutlich. Die Modellergebnisse zeigen jedoch

weniger Extremereignisse als es in einem Klimaszenario ohne Strahlungsmanagement in der 2. Hälfte des 21. Jahrhunderts berechnet wird (CURRY et al. 2014).

Die klimatischen Auswirkungen von SAM können nur berechnet werden, wenn die Entwicklung des Schwefels (S) zu Sulfataerosolen und dessen globale Verteilung möglichst genau verstanden sind. Die Oxidation von Schwefeldioxid zu Schwefelsäure, Aerosolbildung und Anwachsen des Aerosols werden durch aerosolmikrophysikalische Modelle berechnet. Diese sind mit Transportmodellen gekoppelt, welche die Dynamik von Strato- und Troposphäre berechnen und so den Transport und die globale Verteilung des Aerosols bestimmen. Die Aerosole werden durch Luftströmungen über den ganzen Globus verteilt, auch wenn sie nur in einem kleinen Gebiet in den Tropen eingebracht werden, wodurch eine regionale Anwendung von SAM nahezu unmöglich wird. Die Injektionshöhe ist für die Lebensdauer der Aerosole wichtig. Je höher, desto länger die Lebenszeit. Doch können derzeitige Flugzeuge nur die untere Stratosphäre (bis etwa 19 km) erreichen. Der Schwefel muss in die Stratosphäre eingebracht werden, denn Sulfate sind gut wasserlöslich und werden in der Troposphäre schnell ausgewaschen.

Die Bandbreite der Ergebnisse von verschiedenen Modellen bei der Berechnung der Schwefelevolution, aber auch beim Transport, ist sehr hoch (NIEMEIER & TILMES 2017). Aus beiden Parametern resultiert der Strahlungsantrieb des Sulfataerosols, die Summe aus solarer und terrestrischer Strahlung, am Oberrand der Atmosphäre. Der Strahlungsantrieb bestimmt die Klimawirkung des Sulfataerosols wie auch der Treibhausgase.

Abb. 8.5-1 (oben) zeigt den für verschiedene Jahre ermittelten Strahlungsantrieb der Treibhausgase (rote Balken) und den dazu gehörigen Unsicherheitsbereich von ca. 1 bis 3,5 W/m². Dem wird der Strahlungsantrieb durch SAM gegenüber gestellt, den vier verschiedene Modelle für drei verschiedene Injektionsraten (2, 5 und 10 Tg Schwefel pro Jahr) berechnet haben (farbige Kreuze). Eine Injektion von 10 Tg(S)/Jahr ergibt je nach Modell einen Strahlungsantrieb zwischen -1,7 und -5 W/m². Der Strahlungsantrieb durch anthropogene Treibhausgase des Jahres 2011 (2,3 W/m²) ließe sich mit SAM nur mit den grün und blau gekennzeichneten Modellergebnissen auf den vorindustriellen Wert zurückführen. Zum Vergleich: die stärkste Vulkaneruption des letzten Jahrhunderts, Pinatubo 1991, brachte ca. 8 Tg(S) in die Stratosphäre. *Abb. 8.5-1* (unten) zeigt die Auswirkung auf die Bodentemperatur. Die roten Balken geben jetzt die simulierten Temperaturänderungen für zwei projizierte Klimaszenarien im Jahr 2100 (STOCKER et al. 2013) und die des Jahres 2011 an.

Darunter ist die zu erwartende Abkühlung von SAM dargestellt. Ergebnisse sind nur für zwei der Modelle vorhanden, die große Unterschiede zwischen den Modellen andeuten. Danach wäre es sehr ungewiss, welche Abkühlung bei der Injektion von z.B. 5 Tg(S)/Jahr zu erwarten wäre, $-0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ oder $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$?

Wie stark die Aerosole einfallendes Sonnenlicht streuen, hängt von der Größe des Sulfataerosols ab. Wird die Injektionsmenge erhöht, so wachsen die Aerosole stärker. Als Folge streuen sie weniger Sonnenlicht und die Effizienz der Injektion nimmt ab. Besonders deutlich wird dieser Effekt bei extrem großen Injektionsmengen. Für eine Injektion von 50 Tg(S)/Jahr in die Stratosphäre berechnet mein Modell einen Strah-

lungsantrieb von -6 W/m^2 . Wird die Injektionsmenge verdoppelt, so verstärkt sich der Strahlungsantrieb nur um weitere 2 W/m^2 auf -8 W/m^2 (NIEMEIER & TIMMRECK 2015). Der erzielte Strahlungsantrieb pro Injektionsmenge nimmt ab und damit die Abkühlung am Boden pro Injektionsrate.

Die Wirkung einer Schwefelinjektion hängt auch von der globalen Verteilung des Aerosols ab. Verschiedene Modelle berechnen den Transport der Aerosole unterschiedlich. Besonders variiert der Anteil der Aerosole, der aus den Tropen herauftransportiert wird. Starkwindbänder in der tropischen Stratosphäre erschweren den Transport in die mittleren Breiten umso mehr, je stärker der Wind ist. Zusätzlich wird die Windgeschwindigkeit durch die Aerosolen beeinflusst. Die Sulfataerosole streuen nicht nur solares Licht, sie absorbieren auch terrestrische Strahlung. Dadurch erwärmt sich die Sulfatschicht mit Auswirkungen auf dynamische Prozesse (AQUILA et al. 2014) und der Folge einer Zunahme der westlichen Windkomponente.

Natürlich wird versucht, die Modelle mit Messdaten zu vergleichen. SAM wird nicht in der Natur getestet, aber das natürliche Analogon, der Vulkanausbruch, ermöglicht es, die Evolution und den Transport von Sulfat zu beobachten. Allerdings gibt es nur wenige Messungen, denn Vulkanausbrüche, die stark genug sind, um größere Mengen Schwefel in die Stratosphäre zu bringen, sind selten. Der letzten große Eruption, des Pinatubo auf den Philippinen am 15. Juni 1991, folgte eine etwas kleinere des Cerro Hudson in Chile Anfang August 1991. Dadurch lässt sich in Satellitenmessungen die Herkunft des Sulfates in der Südhemisphäre nur schwer auf eine der beiden Eruptionen zurückführen. So können verschiedene simulierte Transportmuster als zu den Beobachtungen passend angesehen werden. Abb. 8.4-2 zeigt Satellitenmessungen nach dem Ausbruch des Pinatubos. Die größte Sulfatmenge wird 2-3 Monate nach der Eruption in den Tropen gemessen. Aus den Tropen wird das Sulfat jeweils zum Frühjahrsopol transportiert.

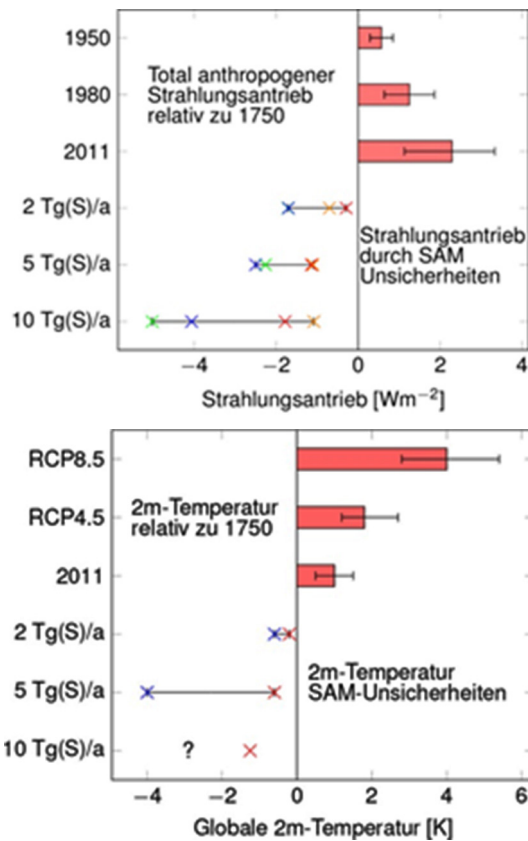


Abb. 8.5-1: Oben: Abschätzungen des Strahlungsantriebs am Oberrand der Atmosphäre. Rote Balken zeigen den Strahlungsantrieb relativ zu 1750 und die schwarzen Balken geben die Unsicherheit an (IPCC 2013). Schwarze Balken und farbige Kreuze darunter geben den Strahlungsantrieb für verschiedene Schwefelinjektionen an (2, 5, und 10 Tg Schwefel/Jahr), ermittelt mit Simulationen von vier verschiedenen Modellen (nach NIEMEIER & TILMES 2017). Unten: Abschätzung der globalen 2m-Temperaturänderung durch Treibhausgase im Jahr 2011 und in zwei Klimaszenarien, sowie durch Schwefelinjektionen aus zwei Modellrechnungen (2 und 5 Tg Schwefel/Jahr).

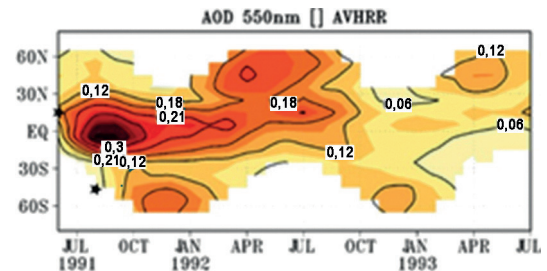


Abb. 8.5-2: Satellitenmessungen (AVHRR) der aerosoloptischen Dicke (AOD) nach der Eruption von Pinatubo (15°N) und Cerro Hudson (46°S) (LONG & STOWE 1994). Die zwei Sterne kennzeichnen die Vulkaneruptionen.

Von SAM Experimenten in der Natur wären keine Ergebnisse zu erwarten, welche Antworten zum Transport und der Klimawirkung ergeben würden. Um in einem realen SAM Experiment signifikante Ergebnisse zu erhalten, müsste die Injektionsrate hoch sein. Kleine Mengen ließen sich nur schwer in Messungen feststellen. Zudem ist die Variabilität des Klimas so groß, dass die Klimaauswirkungen nicht zu erkennen wären. Ein Experiment mit ausreichender Injektionsrate wäre ethisch nicht zu vertreten, denn es entspräche einem SAM-Einsatz. Über ein Experiment mit sehr kleiner Injektionsrate (1 kg Kaliumkarbonat) wird aktuell diskutiert (KEITH et al. 2016). Kaliumkarbonat, eine in der Natur häufig vorkommende Verbindung, würde in der Stratosphäre versprüht. Mit dieser Menge ließen sich evtl. chemische Reaktionen beobachten, die im Labor nicht ermittelt werden können. Großskalige Antworten zum Transport und zum Klimaeinfluss wären hingegen nicht möglich. Der Klimaeinfluss einer Injektion lässt sich nur mit Simulationsrechnungen von Erdsystemmodellen ermitteln. Daher ist es wichtig, diese Modelle weiter zu entwickeln, weitere wichtige Prozesse zu integrieren und mit Messungen zu überprüfen. Dieses geht nur mit Beobachtungen der Erdatmosphäre, z.B. durch Satellitenmessungen. Die nötigen Messinstrumente würden auch hochwertige Messungen im Falle einer Vulkaneruption ermöglichen.

Gesellschaftliche Konsequenzen der »Stratospheric aerosol modification« (SAM)

Neben der wissenschaftlichen Betrachtung möglicher Nebenwirkungen von SAM müssen aber auch Kosten und technische Machbarkeit bewertet werden. In einem hypothetischen Szenario mit weiter ansteigenden Emissionen bis ins Jahr 2040 nehmen ab 2040 die Emissionen durch die Entfernung von CO₂ aus der Atmosphäre ab und erreichen 2095 negative Werte. Um 2040 wird mit SAM der Temperaturanstieg bei 2 °C gehalten. Eine Simulation von TILMES et al. (2016) zeigt, dass Schwefelinjektionen für eine Dauer von 160 Jahren, mit einer maximalen Menge von bis zu 8 Tg(S)/Jahr, nötig wären, um die Begrenzung eines maximalen Temperaturanstiegs auf 2 °C zu erreichen, bis die CO₂-Emissionen ausreichend reduziert wären, um SAM langsam verringern zu können. Ohne SAM würde die Temperatur in der Studie um bis zu 3 °C ansteigen. 8 Tg(S)/Jahr entsprechen der Schwefelmenge einer Pinatubo-Eruption pro Jahr. Die Studie lässt offen, ob die Entfernung von CO₂ aus der Atmosphäre in dem benötigten Ausmaß machbar wäre. Die Transportkosten für die Einbringung der Aerosole in die Stratosphäre wurden von MORIYAMA et al. (2016)

für 1 °C Temperaturreduzierung und 6.700 Flügen pro Tag mit 20 Milliarden US\$/Jahr berechnet. Dazu wäre die Entwicklung neuer Flugzeuge nötig, welche in die Stratosphäre fliegen könnten. Mit derzeit vorhandenen Flugzeugen entstünden um den Faktor 10 höhere Transportkosten. Die Kosten für höhere Injektionsraten steigen überproportional, da die Effizienz der Injektion mit ansteigender Rate abnimmt.

In dieser Abschätzung sind Kosten für ein umfassendes Beobachtungssystem mit Satelliten und Bodenmessungen nicht enthalten. Solches würde benötigt, um z.B. die Sulfatverteilung, Auswirkungen auf andere chemische Spezies, wie Ozon, und das Klima zu überwachen. Zudem müssten die Aktivitäten von intensiven Modellstudien begleitet werden, mit denen die benötigte Sulfatmenge ermittelt werden könnte. Weitere Kosten entstünden durch Kompensationsleistungen für mögliche Nebenwirkungen. Daher wären die Kosten von SAM erheblich höher als nur die reinen Transportkosten.

Dennoch wäre es derzeit für eine Einzelperson, Firma oder Staat möglich SAM anzuwenden, ohne dass diese sich um die Folgen und Nebenwirkungen Gedanken machen müssten. Globale Auswirkungen und politische Krisen wären zu erwarten, bis hin zu möglichen Kriegen, wenn negative Auswirkungen, sei es Dürre oder Überflutung, dem Verursacher zur Last gelegt würden. Dabei wäre der direkte Zusammenhang mit SAM nur extrem schwer nachzuweisen. Daher ist weitere Forschung zu diesem Thema notwendig. Außerdem ist es dringend geboten internationale Vereinbarungen und Regeln zu einer Anwendung von SAM zu beschließen. Haftungsregeln wären notwendig, da bestehende Regeln keine effektiven Kompensationsmöglichkeiten für Folgeschäden enthalten (SAXLER et al. 2015). Es ist daher empfehlenswert eine internationale Organisation für Klimainterventionen zu gründen, welche auf der Grundlage des aktuellen Forschungsstandes Nutzen und Nebenwirkungen bewerten könnte.

Eingriffe in den Strahlungshaushalt der Erde, wie z.B. SAM, dürfen nur als eine Notmaßnahme zur Absicherung katastrophaler Folgen der Klimaerwärmung gesehen werden. Einen Ersatz für Emissionsreduzierungen oder für Anstrengungen, der Atmosphäre CO₂ zu entziehen, dürfen diese Maßnahmen nicht sein. Sie können nur Folgen abmildern, aber die Ursachen nicht bekämpfen und mit jeder zusätzlichen Tonne Kohlenstoff in der Atmosphäre müsste mehr SAM durchgeführt werden. SAM würde auch nicht anderen Folgen der hohen Kohlenstoffkonzentration entgegenwirken. Die Versauerung der Ozeane und dadurch bedingte Auswirkungen würden weiter zunehmen. Es ist sehr viel vernünftiger und sicherer CO₂-Emissionen zu verringern, statt zu versuchen die Folgen nachträglich zu beheben.

Literatur

- ANDERSON, K. & G. PETERS (2016): The trouble with negative emissions, *Science*, 354, 182-183, doi:10.1126/science.aah4567.
- AQUILA, V., C. I. GARFINKEL, P. NEWMAN, L. D. OMAN & D. W. WAUGH (2014): Modifications of the quasi-biennial oscillation by a geoengineering perturbation of the stratospheric aerosol layer, *Geophys. Res. Lett.*, 41, 1738-1744, doi:10.1002/2013GL058818.
- BOYSEN, L. R., W. LUCHT, D. GERTEN, V. HECK, T. M. LENTON & H. J. SCHELLNHUBER (2017): The limits to global-warming mitigation by terrestrial carbon removal, *Earth's Future*, 5, 463-474, doi:10.1002/2016EF000469.
- CRUTZEN, P. J. (2006): Albedo enhancement by stratospheric sulfur injections: A contribution to resolve a policy dilemma?, *Clim Change*, 77, 211-219.
- CURRY, C. L., J. SILLMANN, D. BRONAUGH, K. ALTERSKJÆR, J. N. S. COLE, D. JI, B. KRAVITZ, J. E. KRISTJÁNSSON, J. MOORE, H. MURI, U. NIEMEIER, A. ROBOCK, S. TILMES & S. YANG (2014): A multi-model examination of climate extremes in an idealized geoengineering experiment, *J. Geophys. Res.*, 119, 3900-3923, doi:10.1002/2013JD020648.
- KEITH, D., D. K. WEISENSTEIN, J. A. DYKEMAA, & F. N. KEUTSCH (2016): Stratospheric solar geoengineering without ozone loss, *PNAS*, 113, 14,910-14,914, doi:10.1073/pnas.1615572113.
- LATHAM, J., P. RASCH, C.-C. CHEN, L. K. GADIAN, A. GETTELMAN, H. MORRISON, K. BOWER & T. CHOURLATON (2008): Global temperature stabilization via controlled albedo enhancement of low-level maritime clouds, *Philos. Trans. R. Soc.*, 366, 339-340, doi: 10.1098/rsta.2008.0137.
- LOHMANN, U. & B. GASPARINI (2017): A cirrus cloud climate dial?, *Science*, 357, 248-249, doi: 10.1126/science.aan332.
- LONG, C. & L. STOWE (1994): Using the NOAA/AVHRR to study stratospheric aerosol optical thickness following the Mt. Pinatubo eruption, *Geophys. Res. Lett.*, 21, 2215-2218.
- MILLAR, R. J., J. S. FUGLESTVEDT, P. FRIEDLINGSTEIN, J. ROGELJ, M. J. GRUBB, H. D. MATTHEWS, R. B. SKEIE, P. M. FORSTER, D. J. FRAME & M. R. ALLEN (2017): Emission budgets and pathways consistent with limiting warming to 1.5 °C, *Nature Geoscience*, 10, 741.
- MORIYAMA, R., M. SUGIYAMA, A. KUROSAWA, K. MASUDA, K. TSUZUKI & Y. ISHIMOTO (2016): The cost of stratospheric climate engineering revisited, *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, pp. 1-22, doi: 10.1007/s11027-016-9723.
- NIEMEIER, U. & S. TILMES (2017): Sulfur injections for a cooler planet, *Science*, 357, 246-248, doi: 10.1126/science.aan3317.
- NIEMEIER, U. & C. TIMMRECK (2015): What is the limit of climate engineering by stratospheric injection of SO₂?, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 15, 9129-9141, doi: 10.5194/acp-15-9129-2015.
- NIEMEIER, U., H. SCHMIDT, K. ALTERSKJÆR & J. E. KRISTJÁNSSON (2013): Solar irradiance reduction via climate engineering - Impact of different techniques on the energy balance and the hydrological cycle, *JGR*, 118, 11,905-11,917, doi: 10.1002/2013JD020445.
- ROBOCK, A. (2016): Albedo enhancement by stratospheric sulfur injections: More research needed, *Earth's Future*, 4, 644-648, doi:10.1002/2016EF000407.
- SAXLER, B., J. SIEGFRIED & A. PROELSS (2015): International liability for transboundary damage arising from stratospheric aerosol injections, *Law, Innovation and Technology*, 7, 112-147, doi: 10.1080/17579961.2015.1052645.
- SCOTT, V., R. S. HASZELDINE, S. F. B. TETT & A. OSCHLIES (2015): Fossil fuels in a trillion tonne world, *Nature Climate Change*, 5, 410-423, doi: 10.1038/nclimate2578.
- STOCKER, T., D. QIN, G.-K. PLATTNER, M. TIGNOR, S. ALLEN, J. BOSCHUNG, A. NAUELS, Y. XIA, V. BEX & P. MIDGLEY (2013): Summary for Policymakers, book section SPM, pp. 1-30, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, doi: 10.1017/CBO9781107415324.004.
- TILMES, S., J. FASULLO, J.-F. LAMARQUE, D. MARSH et al. (2013): The Hydrologic Impact of Geoengineering in the Geoengineering Model Intercomparison Project (GeoMIP), *J. Geophys. Res.*, 118 (19), 11,036-11,058, doi: 10.1002/jgrd.50868.
- TILMES, S., B. M. SANDERSON & B. C. O'NEILL (2016): Climate impacts of geoengineering in a delayed mitigation scenario, *Geophysical Research Letters*, 43, 8222-8229, doi: 10.1002/2016GL070122.

Kontakt:

Dr. Ulrike Niemeier
Max Planck Institut für Meteorologie
ulrike.niemeier@mpimet.mpg.de

Niemeier, U. (2018): *Climate-Engineering: Ein Wundermittel gegen den Klimawandel?* In: Lozán, J. L., S.-W. Breckle, H. Graßl, D. Kasang & R. Weisse (Hrsg.). *Warnsignal Klima: Extremereignisse*. pp. 357-361. Online: www.klimawarnsignale.uni-hamburg.de. doi:10.2312/warnsignal.klima.extremereignisse.54.