

Seminararbeit:

# Aerosole

Ist der Einsatz von Aerosolen eine geeignete Methode zur gezielten Beeinflussung des globalen Klimas?

Von Jakob Sawatzki und Julian Bruhns

# Inhaltsverzeichnis

I.	Einleitung	3
II.	Grundinformationen	4-8
	a. Climate Engineering	4
	b. Aerosole	5
	c. RCP-Szenarien	7
III.	Datenauswertung	9
IV.	Abwägung weiterer Faktoren	17-19
	a. Regionaler und saisonaler Einsatz	17
	b. Aerosolkonzentration in der Luft	18
	c. Auswirkungen bei anderen RCP-Szenarien	19
V.	Abwägung zur Aerosolnutzung	20
VI.	Quellenverzeichnis	22
VII.	Anhang	23

## I. Einleitung

Seit einigen Jahren steht die Weltbevölkerung vor einem großen Problem. Durch mehrere Faktoren hat sich die Erde in den letzten Jahrzehnten stark erwärmt. Zu nennen ist der Treibhauseffekt, der durch Treibhausgase wie Kohlenstoffdioxid oder Wasserstoff hervorgerufen wird. Durch diese Gase gerät der Strahlungshaushalt der Erde durcheinander und es wird viel von der langwelligen Strahlung, die von der Erde ins All reflektiert werden soll, von diesen Treibhausgasen absorbiert oder zurück zur Erde reflektiert. Dadurch wird mehr Strahlung in der Atmosphäre gehalten und die Erde erwärmt sich. Zusätzlich holzen die Menschen den Regenwald ab, der die globale Klimaanlage ist. Der Regenwald kühlt, indem er das Wasser, das über ihm abregnet, über die große Blattoberfläche schnell wieder verdunstet. Dadurch kommt es zur Wolkenbildung, welche wiederum eine Abkühlung aufgrund ihres Reflexionsvermögens zur Folge haben. Außerdem wandeln die vielen Pflanzen bei der Photosynthese das Treibhausgas Kohlenstoffdioxid auf natürliche Weise in

Sauerstoff um. Ohne den Regenwald wäre der Kohlenstoffdioxidgehalt der Atmosphäre um ein Viertel höher<sup>1</sup>.

Durch die vermehrte Abholzung können wir die positiven Einflüsse des Regenwaldes immer weniger nutzen. Durch die immer stärkere Globalisierung und den vermehrten Schadstoffausstoß, belastet die Menschheit die Luft immer mehr mit Treibhausgasen. Wir schrauben nicht zurück, sondern machen alles nur noch schlimmer. Das liegt an den Ansprüchen der Gesellschaft, in der wir heute leben. Wir wollen und können auf vieles nicht mehr verzichten. Wir essen zu viel Fleisch, bauen zu große Fahrzeuge und konsumieren nicht immer saisonale und regionale Früchte. Wir leben zu luxuriös und zu sehr auf Kosten anderer Länder, die sich noch entwickeln.

Um das Voranschreiten des Klimawandels zu stoppen, müssten wir weniger in Anspruch nehmen und Einsparungen in Kauf nehmen. Aber das funktioniert noch nicht gut.

Eine mögliche Chance, dem Klimawandel auch ohne eine massive Verhaltensänderung entgegenzuwirken, ist in den letzten Jahren entstanden und es wurden vielfältige Ideen zum „Climate Engineering“ entwickelt. Es soll zur Lösung unsere Probleme mit der Erderwärmung beitragen.

In dieser Arbeit werden wir uns auf den Einsatz von Aerosolen, einer Möglichkeit des Climate Engineerings unter vielen, beschränken und diesen unter moralischen, sozialen und wirtschaftlichen Aspekten untersuchen, sowie die Effektivität und die Folgen für das Klimasystem anhand von Modelldaten prüfen. Am Ende werden wir nach der Abwägung von Vor- und Nachteilen der Methode ein persönliches Fazit ziehen.

## II. Grundinformationen

### a. Climate Engineering

Climate Engineering ist ein Begriff, der in der heutigen Zeit immer mehr an Bedeutung gewinnt. Hinter diesem Begriff steckt ein globales Problem, die anthropogene Beeinflussung der Erde. Dabei ist der anthropogene Einfluss die Ursache für viele gravierende globale Probleme wie zum Beispiel die Erderwärmung. Climate Engineering ist der Oberbegriff für das technische Eingreifen und Beeinflussen des Klimas durch verschiedene Techniken und stellt eine Option für den Kampf gegen den Klimawandel dar. Das Hauptproblem, das im Fokus des Klimawandels steht, ist der steigende CO<sub>2</sub>-Gehalt und die daraus folgende Erderwärmung sowie andere für die Erderwärmung verantwortliche Prozesse. Denn der erhöhte Treibhausgasgehalt in der Luft ist tödlich für viele Lebewesen und auch das wärmere Klima kann zur Folge haben, dass Teile der Erde vertrocknen und unbewohnbar werden. Climate Engineering könnte allerdings globale Auswirkungen auf das Klima und verschiedene Ökosysteme haben, wodurch die Lebensbedingungen von Flora und Fauna beeinflusst würden. Daher sollte dessen Einsatz über die wirtschaftlichen Aspekte hinaus sehr genau überprüft werden.

---

<sup>1</sup> Frank, Renate: „Was hat Kaffee mit dem Klima zu tun?“. [www.ernaehrungsberatung-frank.de/?page\\_id=292](http://www.ernaehrungsberatung-frank.de/?page_id=292)

Es gibt mehrere Methoden zur Bekämpfung des Klimawandels, wie zum Beispiel die Beeinflussung des Strahlungshaushalts der Erde durch die Bildung von Wolken durch das Verteilen von kleinsten Partikeln in der Luft, damit das Wasser in der Luft besser kondensieren kann, oder die Platzierung von Spiegeln im Weltraum und Verteilung von Aerosolen in der Stratosphäre, um mehr Sonnenstrahlen zurück in den Weltraum zu reflektieren.

Des Weiteren kann man durch neue technische Errungenschaften den CO<sub>2</sub> Gehalt in der Luft und im Wasser durch Filter verändern. Dadurch könnte man eine Verbesserung des Klimas und eine Rettung der Lebensräume erreichen.

Climate Engineering zielt, wie oben erwähnt, darauf ab, das Klima und das Wetter mit neuartigen Technologien auf lange Sicht zu beeinflussen, um der Erderwärmung entgegen zu wirken und somit vielleicht in einigen Jahren eine Lösung für unsere Klimaprobleme zu finden<sup>2 3</sup>.

## **b. Aerosole**

Als Aerosole werden feste oder flüssige Teilchen bezeichnet, die fein verteilt in der Luft schweben. Aerosolpartikel sind sehr kleine Partikel, deren Größe zwischen 0,5 nm und mehreren 10 µm variiert. Sie sind also nicht für das menschliche Auge sichtbar. Sichtbar werden sie erst bei einer Konzentration von 10.000 - 100.000 Partikeln pro Kubikzentimeter. Aerosole entstehen auf unterschiedliche Arten. Zum Beispiel können sie sich spontan durch Kondensation oder Resublimation bilden oder wenn feine Staubpartikel in die Luft geblasen werden.

Ein Aerosol ist ein heterogenes Gemisch aus flüssigen und festen Schwebeteilchen in einem Gas. Das Verhalten hängt dabei stark von den Teilchen und dem Trägergas ab. Je schwerer ein Aerosolpartikel ist, desto schneller sinkt es zur Erde. Somit ist das System der Aerosole ein sehr dynamisches System. Es unterliegt ständigen Änderungen durch Kondensation von Wasser an bereits vorhandenen Partikeln, was zu einer Gewichtserhöhung führt. Zudem können flüssige Aerosolpartikel verdunsten und aus mehreren kleinen Partikeln können größere Partikel entstehen oder Teilchen werden an umgebende Gegenstände abgeschieden.

Davon abhängig kann man Aerosole noch in zwei weitere Gruppen einteilen. Man unterscheidet nämlich zwischen primären und sekundären Aerosolen. Primäre Aerosole bilden sich direkt an oder in der Quelle. Dabei handelt es sich meist um mechanische oder thermische Prozesse, wie das Aufwirbeln von Staub oder zum Beispiel das Verbrennen von Holz. Sekundäre Aerosole bilden sich durch chemische Reaktionen oder an einen Kondensationskern, genau wie es zum Beispiel bei der Nebelbildung geschieht. Ab einer bestimmten Luftfeuchtigkeit kondensiert das Wasser aus der Luft an den Aerosolpartikel und es beginnen sich Tröpfchen zu bilden. Diese stoßen dann ab einer bestimmten Konzentration

---

<sup>2</sup>Dr. Rickels, Wilfried et al (2011): „Gezielte Eingriffe in das Klima?“, Kiel Earth Institute

<http://www.kiel-earth-institute.de/sondierungsstudie-climate-engineering.html>

<sup>3</sup> Kiel Earth Institute: „Climate Engineering“. <http://www.climate-engineering.eu/home-35.html>

zusammen und es bilden sich Wolken und wenn zu viel Wasser kondensiert ist, regnet es. Deshalb nennt man Aerosolpartikel auch Wolkenkondensationskeime.

Die Aerosolkonzentration ist natürlich auch von der Schwebhöhe abhängig. Bei einer Höhe von 10 Kilometer über dem Erdboden ist die Konzentration nur noch ein Zehntausendstel des Wertes am Boden. Besonders Vulkanausbrüche können zu einer erhöhten Konzentration in der Höhe führen, die dann Wetter, Klima und Flugverkehr stark beeinträchtigt.

Aerosole haben zusätzlich noch weitere Eigenschaften, die das Klima beeinflussen. Sie können, wie Wolken, Sonnenstrahlen reflektieren. Denn wenn Sonnenstrahlen auf diese kleinsten Partikel treffen, werden sie ohne weitere Abgabe von Energie zurück in den Weltraum gespiegelt. Diese Eigenschaft kann man gezielt nutzen, um den Strahlungshauhalt der Erde zu verbessern<sup>4</sup>.

### c. RCP-Szenarien

Um die Wirkung von künstlich in der Atmosphäre ausgebrachten Aerosolen zu untersuchen, kann man kleinere Feldstudien durchführen. Diese können aber nur regionale Ergebnisse liefern und sind nicht geeignet globale Risiken abzuschätzen. Daher ist es notwendig die Folgen der Aerosolausbringung mit Klimamodellen zu simulieren. Für die allgemeine Vorhersage des zukünftigen Klimas wurden unterschiedliche Szenarien entwickelt, in denen man das zukünftige Verhalten der Menschheit versucht zu berücksichtigen. Das sind die sogenannten RCP (Representative Concentration Pathway) Szenarien. Diese legt man auch der Simulation der künstlichen Aerosolverteilung in der Atmosphäre als Antrieb zugrunde und nutzt sie als Referenzwerte, um den Einfluss des Climate Engineerings separieren zu können.

Die verschiedenen RCP Szenarien wurden vom Weltklimarat (IPCC) erstellt und stellen mögliche Szenarien für die Entwicklung des globalen Klimas dar. Es gibt vier verschiedene RCP Szenarien. Sie alle haben im Zeitraum von 1860 bis 2005 den gleichen Verlauf, da Sie in diesem Bereich die Vergangenheit beschreiben und daher keine Abweichungen voneinander haben können. Die Namensgebung der einzelnen Szenarien ergibt sich aus dem einheitlichen Kürzel "RCP" und der darauffolgenden Zahl. Diese Zahl beschreibt den durchschnittlichen Strahlungsantrieb von 1850-2100 in  $W/m^2$  (Watt pro Quadratmeter).

RCP 2.6 beschreibt ein Szenario in dem die  $CO_2$ -Dichte in der Luft bei ca. 400 ppm (parts per million) am Ende dieses Jahrhunderts liegt. In diesem Szenario liegt der Strahlungsantrieb, wie man schon am Namen ablesen kann, bei  $2,6 W/m^2$ . Dieses RCP stellt das Szenario mit der geringsten Treibhausgaskonzentration, dem niedrigsten globalen Temperaturanstieg und dem geringsten Strahlungsantrieb dar. Der Temperaturanstieg ist so gering, dass er unter dem  $2^\circ C$  Ziel bleibt, womit ein Eintreffen dieses Szenarios als Optimalfall zu werten wäre. Die

---

<sup>4</sup> Chemie.de: "Aerosol". <http://www.chemie.de/lexikon/Aerosol.html>

durchschnittliche Temperaturänderung ist aus dem Grund nicht allzu aussagekräftig, da in bestimmten Regionen (zum Beispiel in Ozeannähe) der Temperaturanstieg nur bei ca. 1°C liegt, wobei es auch Gebiete gibt, in denen die Temperatur deutlich höher ansteigt.

Das RCP 4.5 ist das Szenario, mit dem am meisten in Simulationen und Analysen gearbeitet wird, da es eine mittlere Einstufung erhalten hat. In diesem Szenario gibt es eine mäßig hohe Treibhausgaskonzentration von 650 ppm, einen Strahlungsantrieb von 4,5 W/m<sup>2</sup> und dadurch auch einen relativ geringen Temperaturanstieg von 2,6°C. Dies hat einen Temperaturanstieg von 2°C bis 3°C zur Folge und hat bereits große negative Auswirkungen auf das Leben der Tiere und der Menschen. Viele Tier- und Pflanzenarten würden dann aussterben und große Teile der Erde werden durch eine Austrocknung nicht mehr bewohnbar.

Das RCP 6.0 ist ein Szenario mit etwas höherer Treibhausgaskonzentration, die bei 850ppm liegt. Der Strahlungsantrieb liegt bei 6,0 W/m<sup>2</sup>. Dies hat etwas extremere Folgen für das Klima und die Bewohner der Erde. Die Temperatur kann sich in Teilen schon um 5°C erhöhen und dies hat kritische Auswirkungen auf das Leben der Menschen.

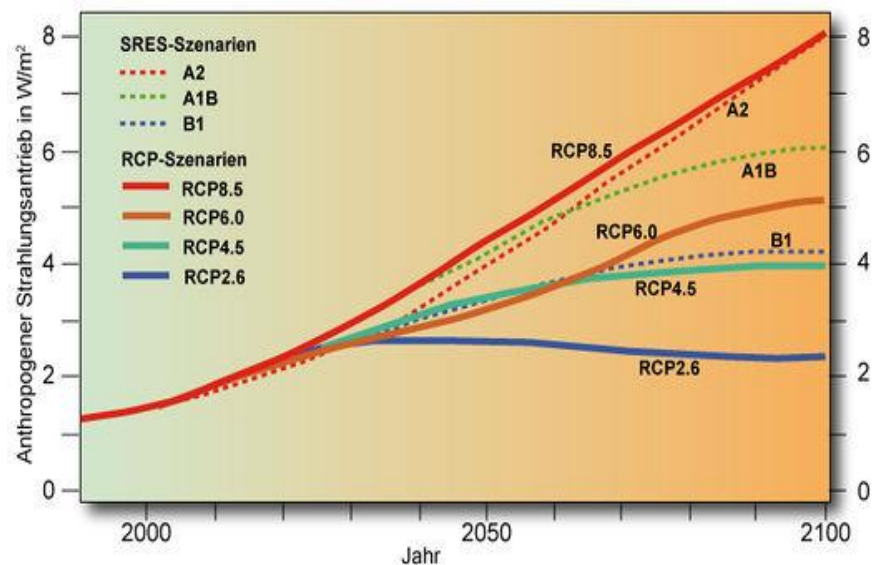


Abb. 1: Strahlungsantrieb der RCP-Szenarien ;  
Quelle: Klimawiki(9.8.2015): „RCP-Szenarien“.

<http://wiki.bildungsserver.de/klimawandel/index.php/RCP-Szenarien>

Das schlimmste Szenario ist das RCP 8.5. Es bringt extrem schädliche Folgen mit sich. Bei diesem Szenario liegt der Wert der Treibhausgaskonzentration bei 1370 ppm und der Strahlungsantrieb liegt bei 8,5 W/m<sup>2</sup>. Der durchschnittliche globale Temperaturanstieg liegt bei ca. 4,8°C, wobei diese Aussage relativ wenig über den teilweise extrem hohen regionalen Temperaturanstieg aussagt. Großflächig steigt die Temperatur im Kontinentalinneren um ca. 8°C an, in Polarregionen sogar um bis zu 11°C. Relativ wenig beeinflusst sind dabei die Ozeane, wobei die Betonung auf relativ liegt, da es in den Ozeanregionen ebenfalls teilweise zu Anstiegen von bis zu 5 Grad kommt<sup>5 6</sup>.

### III. Datenauswertung

<sup>5</sup> Klimawiki(9.8.2015): „RCP-Szenarien“. <http://wiki.bildungsserver.de/klimawandel/index.php/RCP-Szenarien>

<sup>6</sup> Bildungsserver:“ RCP-Szenarien“. <http://bildungsserver.hamburg.de/unsicherheiten-und-szenarien/4105604/rcp-szenarien/>

Die folgende Datenauswertung soll zeigen, welche Auswirkungen eine künstliche Aerosol-injektion in die Stratosphäre auf die globale Temperaturverteilung hat. Die Maßnahme ist mit dem RCP4.5-Szenario gekoppelt und wurde am Max-Planck-Institut für Meteorologie in Hamburg simuliert.<sup>7</sup>

Das Climate-Engineering(CE)-Experiment, dem die hier genutzten Daten entstammen, entspricht bis 2020 dem RCP4.5-Verlauf. Der zu diesem Zeitpunkt bestehende Strahlungsantrieb wird zunächst für 50 Jahre durch die Ausbringung von Schwefeldioxid (SO<sub>2</sub>) in der Stratosphäre stabilisiert. Die SO<sub>2</sub>-Injektion muss wegen des zunehmenden Strahlungsantriebs des RCP4.5-Szenarios schrittweise verstärkt werden, um den Netto-Strahlungsantrieb durchgehend konstant zu halten. Zwischen 2070 und 2090 werden die Climate-Engineering-Maßnahmen beendet, um einen möglichen Abbrucheffect zu simulieren. Ein Abbruch in der Zukunft ist aus verschiedenen Gründen denkbar:

1. Politische Konflikte zwischen den Akteuren,
2. Technische Probleme,
3. Unerwünschte Folgen der Maßnahme.

Diese Prognose beschränkt sich auf die nächsten 85 Jahre, in denen der Strahlungsantrieb zunächst bis 2070 stabilisiert wird und in den folgenden 20 Jahren abrupt eingestellt wird. Durch das zugrundeliegende RCP4.5-Szenario erfolgt der anthropogene Ausstoß von Treibhausgasen relativ gemäßigt<sup>8</sup>. Es beschreibt einen ansteigenden Treibhausgasausstoß bis 2040, wenn dieser seinen Höchstwert erreicht. Danach stabilisiert sich der Ausstoß auf einem relativ moderaten Wert<sup>9</sup>. Dieses Szenario ist ein optimistisches Szenario, auf welches wir, bedingt durch unser Verhalten, im Moment nicht zusteuern.

Zunächst wollen wir das Referenzklima betrachten und zeigen, wie das Klima der Erde in den kommenden Jahren aussehen könnte, wenn wir das Szenario RCP 4.5 als Grundlage nutzen. In Abbildung 3 kann man die simulierte Änderung der globalen Durchschnittstemperatur sehen. Diese Änderung wird als Differenz aus den lokalen Durchschnittstemperaturen des Zeitraums von 2050 bis 2069 und des Zeitraums von 1969 bis 1990 bestimmt. Dargestellt sind Änderungen zwischen -3,6 °C bis +3,6 °C. Die Mitte der Skala liegt dort, wo die Differenz null ist, sich die Temperatur also nicht ändert. Alle Teile, die blau sind, kühlen sich über den Zeitraum ab. Aber man sieht kaum blaue Bereiche. Es gibt also kaum Bereiche auf der Welt, die sich in dem Zeitraum 1990 – 2069 abkühlen.

---

<sup>7</sup> Niemeier,Ulrike; Schmidt,Hauke 2013; IMPLICC - Implications and risks of engineering solar radiation to limit climate change. World Data Center for Climate. CERA-DB "DKRZ\_Ita\_695"  
[http://cera-www.dkrz.de/WDCC/ui/Compact.jsp?acronym=DKRZ\\_Ita\\_695](http://cera-www.dkrz.de/WDCC/ui/Compact.jsp?acronym=DKRZ_Ita_695)

<sup>8</sup> World Meteorological Organization, Schweiz: "Emission Scenarios".  
[https://www.wmo.int/pages/themes/climate/emission\\_scenarios.php](https://www.wmo.int/pages/themes/climate/emission_scenarios.php)

<sup>9</sup> Bildungsserver: "Konzentration von Kohlenstoffdioxid". <http://bildungsserver.hamburg.de/zukuenftige-antriebskraefte/2081518/konzentration-co2-artikel/>

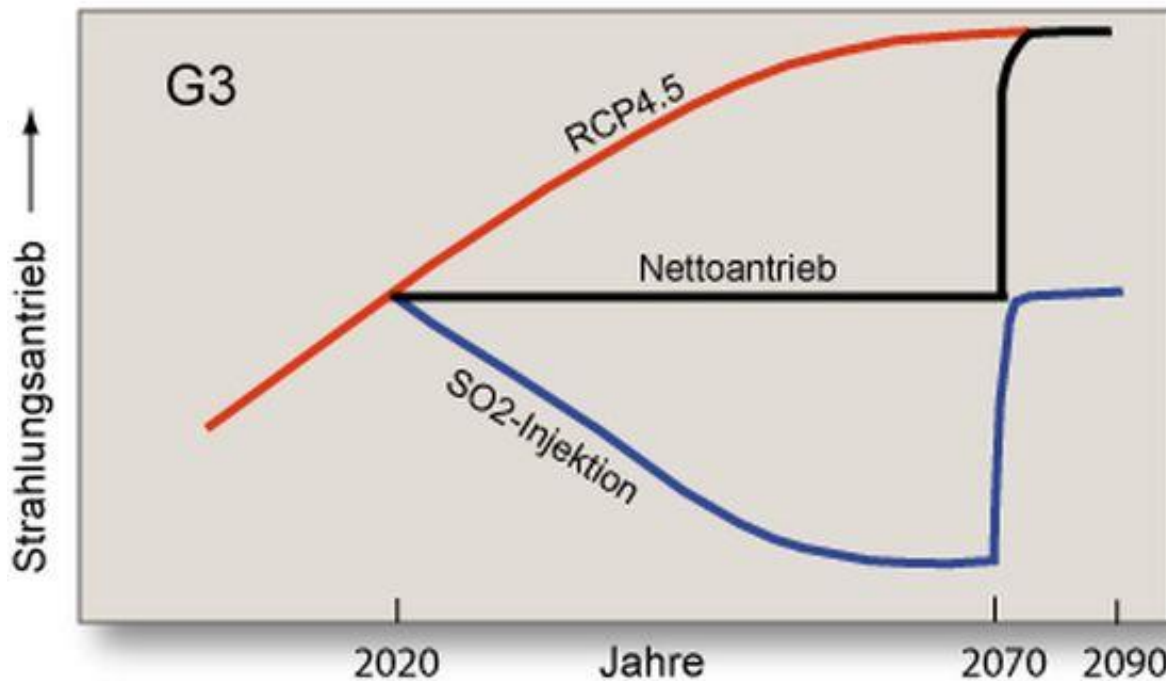


Abb.2: Strahlungsantrieb durch das Szenario RCP4.5 (rote Linie), die SO<sub>2</sub>-Injektion (blau) und den Nettoantrieb (schwarz). Quelle: Klimawiki. „Solar Radiation Management (SRM)“.

[http://wiki.bildungsserver.de/klimawandel/index.php/Solar\\_Radiation\\_Management\\_%28SRM%29](http://wiki.bildungsserver.de/klimawandel/index.php/Solar_Radiation_Management_%28SRM%29)

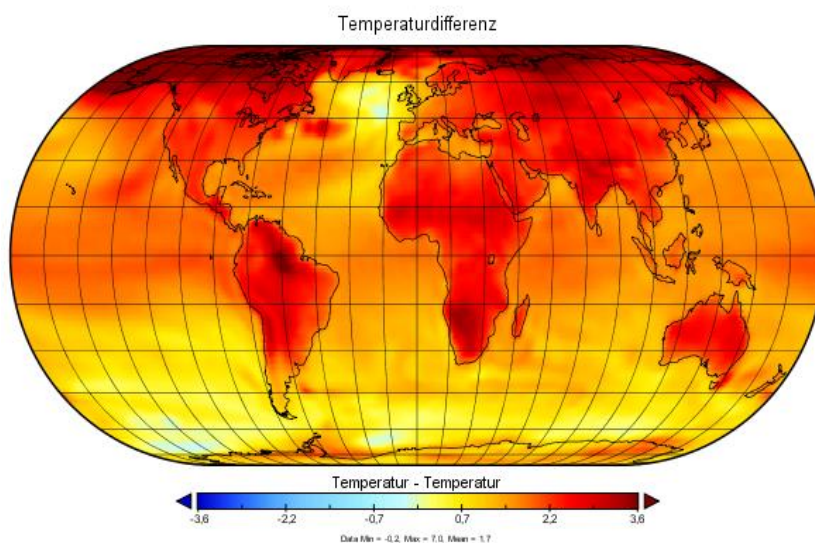


Abb. 3: Temperaturdifferenz von den Zeiträumen 2050-2069 und 1969-1990 ohne Aerosole im Szenario RCP4.5

Tiere können mit dem Temperaturanstieg nicht klar kommen. Auch weil dieser Anstieg nur 50 Jahren braucht, haben die Tiere zu wenig Zeit sich anzupassen. Besonders der Nordpol ist von der Erwärmung betroffen, da es hier ein Maximum mit fast 4°C Erwärmung geben könnte. Als Folge werden Polarkappen schmelzen und z.B. verlieren die Eisbären ihren Lebensraum. In ariden Gebieten könnten als Folge viele Pflanzen vertrocknen und sich dadurch den Lebensraum für einige Tiere verändern. Die Erwärmung der Ozeane könnte zu

Die rote Färbung lässt unschwer erkennen, dass sich die Erde fast in allen Regionen erwärmt. Dieser Temperaturanstieg beträgt 0,8°C bis 1°C über den Meeren und 2°C bis 3°C Grad über den Kontinenten. Dies klingt vielleicht nicht nach viel, denn wir Menschen können uns recht schnell an solche

Klimawechsel anpassen. Aber für Tiere ist ein Anstieg von 3°C gefährlicher. Viele



einem weiträumigen Korallensterben führen und damit Ökosysteme zerstören oder auch das Algenwachstum, was den Sauerstoff für die Fische produziert, beeinträchtigen.

Die Erderwärmung ist also ein direktes Problem für den Menschen, für die Erde, auf der wir leben und ihre tierischen und pflanzlichen Bewohner. Dieses Problem will der Mensch nun lösen. Viele Forscher versprechen sich die Lösung in dem sogenannten „Climate Engineering“. Ein Lösungsansatz, den wir nun auf seine Effektivität und Folgen im Klimasystem untersuchen wollen, ist das großflächige Verteilen von Aerosolen in der Erdatmosphäre. Eine künstlich erzeugte Aerosolschicht in der Stratosphäre soll die Albedo der Erde vergrößern.

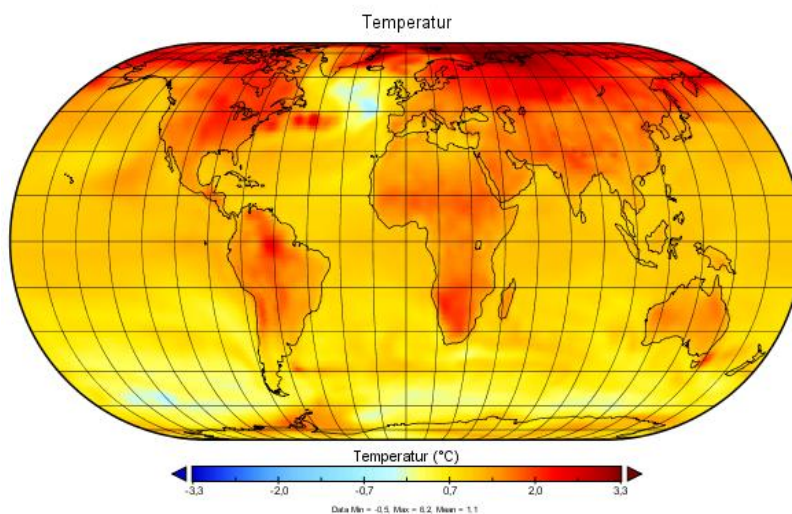


Abb 4: Temperaturdifferenz der Durchschnittstemperaturen von den Zeiträumen 2050-2069 und 1996-1990 unter dem Einfluss von Aerosolen

miteinberechnet. Diese würde die Aerosole wegtragen, sodass an manchen Stellen mehr und an anderen weniger Aerosole wären.

In Abbildung 4 sieht man, dass die Temperatur der Erde unter dem Einfluss von Aerosolen kühler sein würde. Abbildung 4 sieht heller aus als Abbildung 3, obwohl die Skalierung strenger gewählt wurde.

Die Aerosole haben also einen beobachtbaren Einfluss auf die Temperatur. Die Erwärmung der Kontinente ist mit Aerosolen um einige Zehntel Grad geringer. Dabei sind die südlichen Erdmassen weniger von dieser Abkühlung betroffen, als die Nördlichen.

In Abbildung 4 ist die Temperaturentwicklung für den gleichen Zeitraum wie oben dargestellt, nur dass bei der Simulation dieser Daten die Aerosole in der Stratosphäre ausgebracht wurden. Die Aerosolschicht wurde über der ganzen Erde gleichmäßig verteilt. Diese Verteilung bleibt gleichmäßig und eine Advektion durch Winde wurde nicht

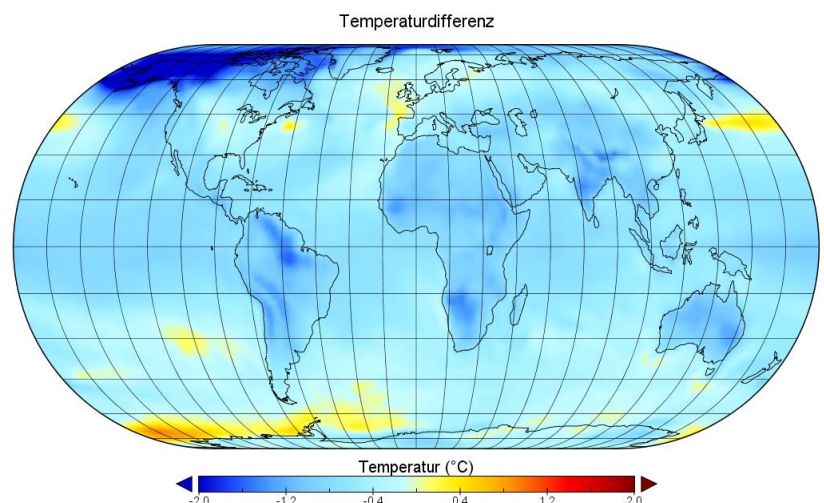


Abb. 5: Temperaturdifferenz in dem Zeitraum 2050-2069 mit zu ohne Aerosolen

Der Bereich um den Nordpol ist sogar um  $3^{\circ}\text{C}$  abgekühlt, während Australien nur maximal  $1^{\circ}\text{C}$  kühler ist. Und auch die Weltmeere kühlen alle mehr oder weniger ab. Das Wasser am Äquator ist deutlich kühler, als das restliche Wasser, aber das hängt damit zusammen, dass dort eine höhere Temperaturdifferenz erzielt werden kann, weil das Wasser ohne Aerosole wärmer ist und dadurch mehr Wärme verlieren kann.

Für einen genaueren Blick auf diesen Temperaturunterschied haben wir die Durchschnittstemperatur im Zeitraum 2050 bis 2069 des RCP 4.5 Szenarios ohne Aerosole mit der Durchschnittstemperatur desselben Zeitraums mit Aerosolen verglichen (Abb. 5). Dazu werden die Temperaturen aus dem Modell ohne künstliche Aerosolschicht von den Temperaturen mit Aerosolschicht abgezogen. Hier stellen alle hell- bis dunkelblauen Bereiche eine Abkühlung durch die Wirkung der Aerosole dar. Die Farbintensivität steht für die Stärke der Abkühlung. Alle gelben bis roten Bereiche stehen für einen Temperaturanstieg. Man sieht deutlich, dass der größte Teil der Erde hellblau eingefärbt ist und sich demzufolge durch die Maßnahme abkühlt. Alle sieben Kontinente sind blau eingefärbt. Es kühlen sich also alle Landmassen unter dem Einfluss von Aerosolen ab. Die Stärke der Abkühlung ist regional unterschiedlich. Zum Beispiel kühlt Australien um ungefähr  $1^{\circ}\text{C}$  ab. Im Vergleich wird Europa nur um  $0,3^{\circ}\text{C}$  im Süden kühler und im Norden gibt es kaum Temperaturunterschiede. Kühlen sich also die Kontinente auf der Südhalbkugel mehr ab als die, die auf der nördlichen Hemisphäre liegen? Das kann man nicht pauschal sagen. Denn Nordamerika, besonders Alaska, ist unter dem Einfluss von Aerosolen extrem kühler. Dort gibt es eine Temperaturdifferenz von bis zu  $2$  Grad Celsius. Aber abgesehen von diesem Extrem kühlen sich die südlichen Erdmassen im Durchschnitt mehr ab.

Dieses Phänomen kann man besser erklären, wenn man die Temperaturdifferenzen für den Sommer und Winter separat betrachtet (siehe Anhang: Abb. 5.1 & Abb. 5.2). Denn wenn die nördliche Hemisphäre im Sommer ist, kühlen Aerosole die Erde relativ gleichmäßig. Sowohl auf der Nordhalbkugel als auch auf der Südhalbkugel ist die Erde um knapp  $1$  Grad Celsius kühler. Nur in besonderen Regionen ist die Erde um noch weitere  $0,5$  Grad kühler. Die Erde wird zu dieser Zeit im Norden stärker beschienen als im Süden. Durch die erhöhte Albedo durch die Aerosole in der Atmosphäre können nicht so viele Sonnenstrahlen die nördliche Hälfte erreichen. Aber auch die Strahlen, die die sonst im Schnitt wärmere Südhalbkugel bestrahlen, werden vermehrt zurückgeworfen. So kommt weniger Energie zur Erde und sie erwärmt sich weniger.

Ein wenig anders ist es dann im nördlichen Winter. Es gibt viele Flächen, die auch zu diesem Zeitraum durch die Aerosole kühler wären. Aber manche Teile eben auch nicht. Zum Beispiel im Osten Amerikas würde sich das Klima sogar erwärmen. Das hängt mit den eingefangenen Strahlen zusammen, die eigentlich abgesendet werden würden. Aber da der Albedo Effekt in beide Richtungen wirkt, können Wärmestrahlungen auch schlechter von der Erde abgestoßen werden. Sie bleiben gefangen und erwärmen so das Land. Derselbe Effekt entsteht auch in Eurasien. Auch dort gibt es mit Aerosolen eine Erwärmung der Luft. In beiden Regionen steigt die Temperatur nur um  $0,5$  Grad Celsius, aber sie kühlen halt nicht, wie eigentlich

geplant, ab. So ist auch an den Küsten der Antarktis eine Temperatursteigung zu sehen. Die findet aber nur über den Wassermassen, direkt an der Antarktis, statt. Es gibt aber auch das andere Extremum. Im Norden Nordamerikas kühlt sich Temperatur extrem ab. Mit einem Abfall von 3 bis 5 Grad Celsius ist hier der größte Temperaturabfall zu vermerken. Besonders Alaska und die Inseln Kanadas im Nord-Osten sind betroffen. Dies kommt durch die Eismassen, die sich in dem Winter bilden. Das Eis verstärkt die Albedo erheblich und sorgt somit für eine stärkere Verminderung der Temperatur.

Man kann also bei dieser genaueren Betrachtung erkennen, dass die regional unterschiedlichen Abkühlungen durch die Jahreszeiten hervorgerufen werden, weil jeder Bereich der Erde in den verschiedenen Jahreszeiten unterschiedlich stark von der Sonne beschienen wird.

Also ist der Einsatz von Aerosolen in Bezug auf die Temperaturstabilität für die nächsten Jahre eine gute Möglichkeit, der Erderwärmung entgegen zu steuern. Die Erde kühlt sich mit dem Einsatz von Aerosolen durchschnittlich um  $0,6^{\circ}\text{C}$  ab. Dieser Effekt tritt schon nach sehr kurzer Zeit ein, ohne lange Aufbauphasen.

Aber was passiert, wenn uns plötzlich die Ressourcen oder die Mittel fehlen, weitere Aerosole in die Luft auszulassen. Was passiert mit dem Klima dann in den folgenden Jahren. Für dieses Szenario haben wir eine Simulation mit Klimadaten, bei denen der Eintrag von Aerosolen im Jahr 2069 eingestellt wird.

In Abbildung 6 kann man die Temperaturverteilung sehen, wie sie sich nach dem RCP 4.5 Szenario ergibt. An den Polen ist es noch verhältnismäßig kalt. Die gemäßigte Zone ist hingegen schon wärmer. Und je näher man an die tropische Zone kommt, desto heißer wird es. Die Abbildung zeigt, dass Strukturen des aktuellen Klimas erhalten bleiben, die Stärke der Erwärmung lässt sich jedoch

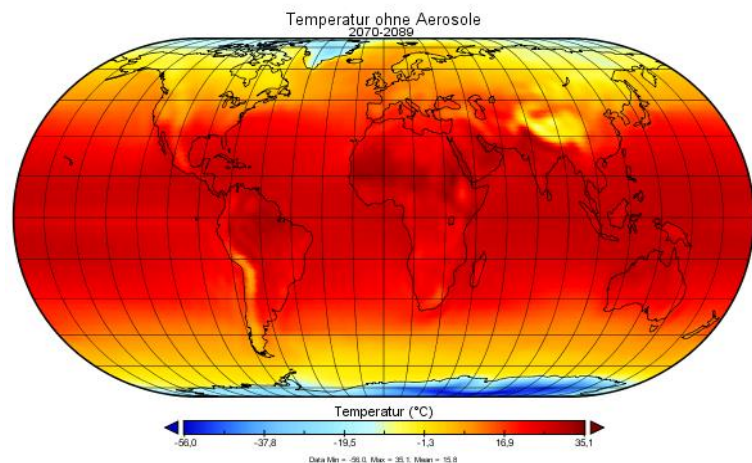


Abb. 6: Temperaturen der Erde nach dem RCP4.5 Szenario in den Jahren 2070-2089

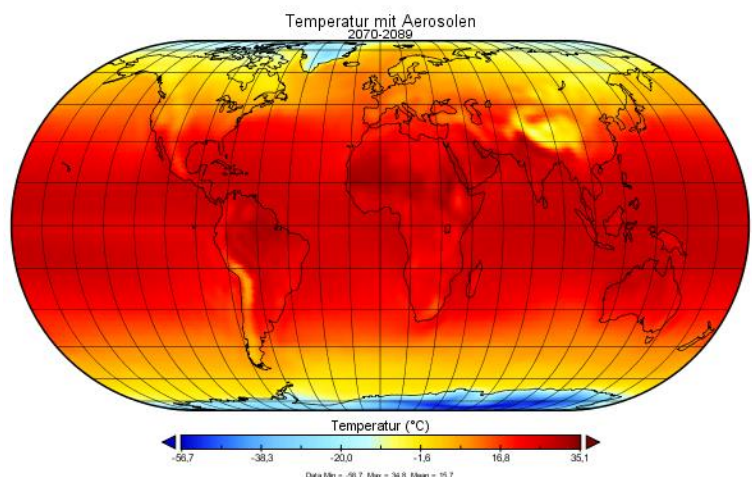


Abb. 7: Temperaturen der Erde mit Aerosol-einsatz in den Jahren 2070-2089, wobei dieser 2070 eingestellt wurde.

nicht gut erkennen. Dazu müsste man die Abweichung zum aktuellen Klima betrachten. Da der Schwerpunkt unserer Untersuchung aber ein anderer ist, haben wir darauf verzichtet und vergleichen nun lediglich mit der Temperaturverteilung nach dem Abschalten des Climate Engineerings.

Stellt man nun das gleiche Szenario dar, nur dass Aerosole eingesetzt wurden, die aber ab 2070 abgesetzt werden, so erhält man für den Zeitraum nach dem Abschalten die in Abbildung 7 gezeigte Temperaturverteilung. Sie zeigt die Durchschnittstemperatur über denselben Zeitraum wie Abbildung 6. Ein Vergleich von Abbildung 6 und 7 zeigt, dass sich die Abbildungen auf dem ersten Blick nicht stark unterscheiden. Auch mit dem vorherigen Aerosoleinsatz gibt es die gleichen Temperaturabstufungsmuster und auch die Pole sind gleich kalt. Es zeigt sich also, dass sich ein ähnliches zukünftige Klima abzeichnet, und das, obwohl vorher mit dem Aerosoleinsatz erfolgreich die globale Durchschnittstemperatur abgesenkt wurde.

Um Unterschiede der beiden Modelle besser sehen zu können, zeigt Abbildung 8 die Temperaturdifferenz der beiden Modellergebnisse.

In Abbildung 8 kann man nun sehen, dass die vorher großflächige Abkühlung unter den Aerosolen, die fast den ganzen Planeten abdeckte, nun fleckenhaft und schwächer wird. Das bedeutet, dass der Kühleffekt, den die Aerosole zuvor hatten, schnell nachlässt. Darüber hinaus gibt es auch Regionen, die nach der Einstellung der Maßnahme

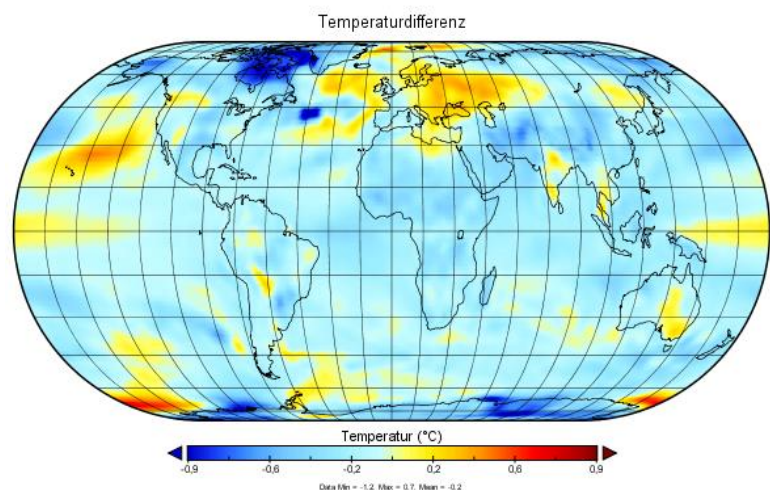


Abb. 8: Temperaturdifferenz von Abb. 4 & 5

wärmer sind als im Vergleichslauf. Europa ist beispielsweise nach dem

Einsatz von Aerosole wärmer, als wenn man nie welche eingesetzt hätte. Auch der Atlantik auf derselben Höhe erwärmt sich durch den vorherigen Aerosoleinsatz. Ansonsten sind im allgemeinen Bereiche, die vorher 1 bis 2 Grad Celsius kühler waren, nunmehr maximal 0,7 Grad kühler. Doch der Großteil der Erde zeigt nur geringe Abweichungen vom Referenzklima. Meist sind es Flächen, die unter Aerosolen 0,5 bis 1 Grad kühler waren, nun aber nur noch maximal 0,2 Grad kühler sind. Die Temperatur mit vorheriger Aerosolbehandlung hat sich also innerhalb weniger Jahre den Temperaturen ohne Behandlung angenähert.

Man kann also sagen, dass Aerosole die Temperatur der Erde abkühlen. Dies geschieht sogar in recht kurzer Zeit und es ist somit eine recht effektive Methode, der Erderwärmung entgegen zu steuern. Aber man kann auch sehr gut sehen, dass man die Behandlung mit den Aerosolen dann nicht einfach absetzen kann, wenn man sein Ziel erreicht hat. Denn kurz

nach dem Absetzen schießen die Temperaturen wieder zurück in den Bereich, den das Klima auch ohne Aerosole erreicht hätte. Ein solch rapider Temperaturanstieg auf relativ kurzen Zeitskalen stellt aber für bestehende Ökosysteme eine große Gefahr da

## IV. Abwägung weiterer Faktoren

### a. Regionaler und saisonaler Einsatz in der Troposphäre

Eine weitere Frage, die sich stellt, wenn man den Einsatz von Aerosolen in der Troposphäre, also in unteren Luftschichten, betrachtet, ist, wie man sie am klügsten einsetzt. Dabei geht es um den Einsatz in Bezug auf regionale Gegebenheiten, wie die durchschnittliche Verdunstungsraten und den Albedowert in der Region. Um die höchste Effektivität der Aerosolfreisetzung zu erzielen, empfiehlt es sich die Aerosole besonders in Gebieten mit mäßigen bis hohen Verdunstungsraten und einem niedrigen Albedowert einzusetzen. Denn man könnte Zeit, Aufwand und vor allem Geld sparen, wenn man Aerosole schlau einsetzt. Denn wenn Aerosole in manchen Teilen der Erde keinen Effekt zeigen, dann muss man sie dort auch nicht einsetzen.

So ist die Aerosolnutzung in von Schnee bedeckten Regionen hinfällig, da auf Eis und Schnee eine relativ geringe Umwandlung in thermische Energie passiert.

Damit kommt man auf ein weiteres Kriterium für die Auswahl eines geeigneten Gebietes, und zwar eine ausreichend hohe Luftfeuchtigkeit. Dieses Kriterium eliminiert Wüstenregionen, die nicht in der Nähe von Wasserflächen sind, aus dem Auswahlprozess für mögliche Einsatzgebiete.

Regionen, die allerdings wüstenartige Eigenschaften haben, wie zum Beispiel eine sehr hohe Temperatur, dafür aber in der Nähe von Wasserflächen liegen, sind gut geeignet, da sie folglich auch eine hohe Verdunstungsrate haben und sich in diesem Gebiet gut Wolken bilden können. Der Aerosoleinsatz verstärkt die Wolkenbildung wodurch mehr Wasser ins Inland transportiert wird, was dort teilweise abregnet. Dadurch kann die Fruchtbarkeit des Bodens erhöht werden, da durch höheren Niederschlag das Pflanzenwachstum angeregt wird und sich die vegetativen Zonen von Küstennähe aus weiter ausbreiten können. Durch Wurzelgeflechte im Boden wird ebenfalls die Bodenfestigkeit gestärkt und es kommt zu weniger Bodenerosion.

Zusammenfassend gesagt bergen Aerosole in warmen, wassernahen Gebieten mit hoher Verdunstungsrate ihr größtes Potential, da ihre Wirkung dort am effektivsten ist <sup>10 11</sup>.

### b. Aerosolkonzentration in der Luft

---

<sup>10</sup> Max-Planck-Gesellschaft (27.2.2004): „Rauchende“ Regenwolken über dem Amazonas“.

<https://www.mpg.de/486751/pressemitteilung20040227>

<sup>11</sup> Chemie.de: „Aerosol“. <http://www.chemie.de/lexikon/Aerosol.html>

Ein großer Vorteil des Aerosoleinsatzes ist, dass die Intensität des Effekts direkt mit der Konzentration der eingesetzten Aerosole zusammenhängt.

Die grundsätzliche Idee besagt, dass je mehr Aerosole man in die Atmosphäre gibt, desto mehr Wolken sich bilden. Das stimmt, jedoch kann das Verhalten der Wolken dabei stark variieren.

Setzt man weniger Aerosolpartikel in die Atmosphäre ein, so bilden sich an den als Kondensationskeim wirkenden Aerosolpartikeln schnell Tröpfchen. Dadurch sinkt sofort die Luftfeuchtigkeit und die einzelnen Kondensationskeime werden zu größeren Tröpfchen, da es keine anderen Partikel gibt, an denen das Wasser kondensieren kann. Dadurch, dass diese entstandenen Tropfen relativ groß sind, stoßen sie leichter zusammen und die Wolke regnet schneller wieder ab.

Setzt man nun viele Aerosolpartikel ein, so wirken sie alle als Kondensationskeime, die, je mehr Aerosolpartikel eingesetzt werden, weniger Wasser an sich kondensieren lassen müssen, um die gleiche Menge Wasser aufzunehmen. Dadurch werden sie nicht so groß und stoßen seltener aneinander. Das in der Luft gelöste Wasser setzt sich an den einzelnen Partikeln fest und kondensiert an ihnen. Dadurch entstehen sehr viele kleine Tröpfchen, die dichtere Wolken bilden, nicht so leicht zusammenstoßen und dadurch auch kaum beziehungsweise erst viel später, abregnen.

Dieses Phänomen von extrem dichten Wolken, die kaum abregnen und dennoch die gleiche Menge Wasser in sich tragen, kann man ebenfalls bei großen Waldbränden oder Vulkanausbrüchen beobachten. Man nennt diese Art von Wolke, die bei Großbränden entsteht, Pyrowolke. Diese Feinstaubwolken können bis in die Stratosphäre aufsteigen und werden dadurch sehr weit getragen<sup>12 13</sup>.

### **c. Auswirkungen bei anderen RCP-Szenarien**

Wie schon in dem Kapitel Grundinformationen beschrieben ist, ist es noch nicht sicher, wie sich das Klima in der Zukunft verändert. Dafür hat man verschiedene RCP-Szenarien erstellt, um eine Möglichkeit zu haben, das sich entwickelnde Klima darzustellen.

Wir wissen jedoch noch nicht, welchem RCP Szenario wir in den nächsten Jahren folgen werden. Doch wenn wir unseren CO<sub>2</sub>-Haushalt in den Griff bekommen und uns dem RCP 2.6 annähern, haben Aerosole nicht mehr dieselben Auswirkungen. Denn die Abkühlung hängt auch von der Erwärmung ab. Wenn die Erde sich nach RCP 2.6 leicht erwärmt, kühlen Aerosole auch nur leicht ab. Hierbei dann um ein halbes Grad auf lange Sicht gesehen.

Wenn wir aber weiter sehr viel CO<sub>2</sub> in die Luft pumpen, können Aerosole auch eine stärkere Abkühlung bewirken. Die würde je nach Erwärmung mehrere Grad sein.

---

<sup>12</sup> Klimawiki (9.8.2015): „RCP-Szenarien“. <http://wiki.bildungsserver.de/klimawandel/index.php/RCP-Szenarien>

<sup>13</sup> Wikipedia (27.11.2015): “Aerosol”. <https://de.wikipedia.org/wiki/Aerosol#Bedeutung>

Man muss also bei einem geringen Ausstoß also nicht unbedingt Aerosole einsetzen, da ihre Wirkung verhältnismäßig klein wäre. Aber je mehr sich die Erde erwärmt, desto effektiver ist der Einsatz von Aerosolen.

## V. Abwägung zur Aerosolnutzung

Die Nutzung von Aerosolen bringt viele Vorteile mit sich, dennoch gibt es einige Nachteile, die erwähnenswert sind. Dieser Text dient der Abwägung der Vor- und Nachteile gegeneinander.

Die offensichtlichsten Vorteile von Aerosolen sind die gewollten Effekte, wie zum Beispiel das Zurückstreuen von Sonneneinstrahlung.

Die Aerosole wirken als Kondensationskeime für Tröpfchenbildung in der Luft. Manche hydrophile Aerosolpartikel führen bereits bei einer Luftfeuchtigkeit von ca. 70% zu einer Tröpfchenbildung. In der Regel bilden aber alle Aerosole spätestens ab einer Luftfeuchtigkeit von 103% Tröpfchen zur Wolkenbildung. Gäbe es keine Aerosolpartikel in der Luft, wäre eine Luftübersättigung von ca. 300% nötig, um in der Luft Tröpfchen bilden zu können. Durch die dadurch erhöhte Wolkenbildung wird der Albedowert über dem Einsatzgebiet stark erhöht. Dadurch wird Sonnenstrahlung reflektiert und die Sonneneinstrahlung kann den Boden und das Wasser nicht mehr so stark erhitzen, wie sie es bei direkter Sonneneinstrahlung tun würde. Bei direkter Sonneneinstrahlung würde die Energie der Sonnenstrahlen in thermische Energie umgewandelt werden. Das Umwandeln in thermische Energie funktioniert umso besser, je niedriger der Albedowert des Stoffes ist. Ein niedrigerer Albedowert geht meist mit dunklerer Farbe und matter Oberfläche einher. Je heller die Farbe und stärker der Glanzeffekt ist, desto höher ist der Albedowert. Ist der Albedowert höher, werden die Sonnenstrahlen stärker reflektiert. Das führt zu einer allgemeinen Abkühlung der Atmosphäre.

Im Vergleich mit anderen Climate Engineering Techniken hat die Aerosolbehandlung ebenfalls einige Vorteile. Nimmt man das Ausfiltern von CO<sub>2</sub> aus der Luft als Beispiel, sieht man, dass dieses Prinzip einen viel höheren technischen, ökonomischen und zeitlichen Aufwand benötigt. Außerdem steht die Intensität der Wirkung von Aerosolen in direktem Zusammenhang mit der Menge der eingesetzten Aerosole. Das heißt, dass bei größeren Aerosolmengen in der Troposphäre mehr Tröpfchenbildung angeregt wird und damit eine dichtere Wolkendecke entsteht, wodurch der positive Effekt der Aerosole zunimmt.

Der erhöhte Albedowert führt zu einer Abkühlung der Erde unterhalb der Aerosole. Diese Abkühlung ist, je nach den Umständen, unterschiedlich hoch. Er ist aber hoch genug, dass man ihn auf jeden Fall merkt. Die Erde kann sich unter guten Umständen nur um 0,5°C bis 1°C abkühlen, bei schlechteren Verhältnissen bis zu 5 Grad Celsius. Das reicht nicht, um die komplette Erwärmung zu stoppen, aber man kann dennoch einen entscheidenden Unterschied erreichen.

Der Einsatz der Aerosole ist auch nicht teuer. Es braucht nur Flugzeuge, die die Aerosole in der Luft austragen, und es braucht die Herstellung der Aerosole. Aber beides ist nicht teuer

und kann leicht durchgeführt werden. Es sind also keine neuen Technologien oder teure Maschinen nötig, die erst gebaut werden müssten.

Nachteile der Aerosolbehandlung könnten bisher unbekannte gesundheitliche Nebenwirkungen für Menschen und Tiere sein, da verschiedene Aerosole noch zu ungenau erforscht sind, um sicher sagen zu können, dass sie keine Gesundheitlichen Risiken mit sich bringen. Bis jetzt gibt es aber keine gravierenden irreparablen Folgen, die durch Aerosole hervorgerufen werden, wie sie zum Beispiel bei Karzinogenen auftreten.

Aber es besteht die Möglichkeit, dass es aufgrund der Aerosoleinsatzung zu saurem Regen kommt<sup>14 15</sup>.

Ein weiterer Nachteil der Aerosolbehandlung ist, dass die Aerosole nur in dem Zeitraum helfen, indem sie eingesetzt werden. Eine langzeitliche Änderung des Klimas kann also nicht durch einen temporären Aerosoleinsatz gegeben werden. Simulationen haben gezeigt, dass das Klima nach dem Abbruch der Aerosolbehandlung in den gleichen Zustand zurückfällt, in dem es zu dem Zeitpunkt ohne Aerosolbehandlung wäre. Man müsste also ab den Punkt, an dem man anfängt, die Luft mit Aerosolen zu bearbeiten, dauerhaft Aerosole nutzen. Andernfalls stellt der abrupte Temperaturanstieg ein großes Risiko für bestehende Ökosysteme dar. Denn Flora und Fauna können sich solch rapiden Änderungen meist nicht schnell genug anpassen. Ist das zu verantworten, da politische Konflikte oder technische Probleme einen dauerhaften Einsatz gefährden könnten?

Wir sind zu dem Schluss gekommen, dass der Einsatz von Aerosolen eine effektive Möglichkeit ist, die sehr schnell fortschreitende Klimaerwärmung zu verzögern. Dabei sind Aerosole nicht das Allheilmittel. Es erfordert mehr als kleine Pollen in der Luft, um unsere Erde zu retten. Als Voraussetzung empfinden wir zusätzlich eine weitsichtige Planung wichtig, da man den Einsatz der Aerosole nicht mal eben pausieren lassen kann. Das würde alle Arbeit, die man bis dann getan hätte, zunichtemachen und man müsste mit fatalen Folgen rechnen.

---

<sup>14</sup> Wikipedia (27.11.2015): Aerosol. <https://de.wikipedia.org/wiki/Aerosol#Bedeutung>

<sup>15</sup> Dr. Tuckermann, R. (WS 2005/06): „Atmosphärenchemie: Aerosole“.

<http://www.pci.tu-bs.de/aggericke/PC5-Atmos/Aerosole.pdf>



## Quellenverzeichnis

Bildungsserver: "RCP-Szenarien".

<http://bildungsserver.hamburg.de/unsicherheiten-und-szenarien/4105604/rcp-szenarien/>

Bildungsserver: "Konzentration von Kohlenstoffdioxid".

<http://bildungsserver.hamburg.de/zukuenftige-antriebskraefte/2081518/konzentration-co2-artikel/>

Frank, Renate: „Was hat Kaffee mit dem Klima zu tun?“

[http://ernaehrungsberatung-frank.de/?page\\_id=292](http://ernaehrungsberatung-frank.de/?page_id=292)

Kiel Earth Institute: „Climate Engineering“.

<http://www.climate-engineering.eu/home-35.html>

Klimawiki (2015): „RCP-Szenarien“.

<http://wiki.bildungsserver.de/klimawandel/index.php/RCP-Szenarien>

Chemie.de: "Aerosol".

<http://www.chemie.de/lexikon/Aerosol.html>

Max-Planck-Gesellschaft (27.2.2004): „Rauchende“ Regenwolken über dem Amazonas“.

<https://www.mpg.de/486751/pressemitteilung20040227>

Niemeier, Ulrike; Schmidt, Hauke (2013): "IMPLICC - Implications and risks of engineering solar radiation to limit climate change". World Data Center for Climate. CERA-DB "DKRZ\_Ita\_695"

[http://cera-www.dkrz.de/WDCC/ui/Compact.jsp?acronym=DKRZ\\_Ita\\_695](http://cera-www.dkrz.de/WDCC/ui/Compact.jsp?acronym=DKRZ_Ita_695)

Dr. Rickels, Wilfried et al (2011): „Gezielte Eingriffe in das Klima?“, Kiel Earth Institute

<http://www.kiel-earth-institute.de/sondierungsstudie-climate-engineering.html>

Dr. Tuckermann, R. (WS 2005/06): „Atmosphärenchemie: Aerosole“.

<http://www.pci.tu-bs.de/aggericke/PC5-Atmos/Aerosole.pdf>

World Meteorological Organization, Schweiz: "Emission Scenarios".

[https://www.wmo.int/pages/themes/climate/emission\\_scenarios.php](https://www.wmo.int/pages/themes/climate/emission_scenarios.php)

Wikipedia (27.11.2015): "Aerosol".

<https://de.wikipedia.org/wiki/Aerosol#Bedeutung>

### **Abbildungen**

Abb. 3-8 selbst erstellt mit Daten nach

Niemeier, Ulrike; Schmidt, Hauke 2013; IMPLICC - Implications and risks of engineering solar radiation to limit climate change. World Data Center for Climate. CERA-DB "DKRZ\_Ita\_695"

[http://cera-www.dkrz.de/WDCC/ui/Compact.jsp?acronym=DKRZ\\_Ita\\_695](http://cera-www.dkrz.de/WDCC/ui/Compact.jsp?acronym=DKRZ_Ita_695)

Heruntergeladen vom Hamburger Bildungsserver (<http://bildungsserver.hamburg.de/climate-engineering/>)

## VI. Anhang

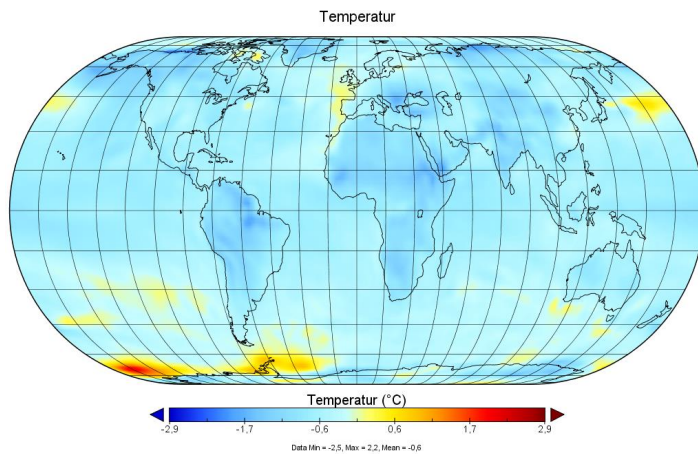


Abb. 5.1: Temperaturdifferenz in dem Zeitraum 2050-2069 mit Aerosolen im Vergleich zu ohne Aerosole im Sommer der Nordhalbkugel

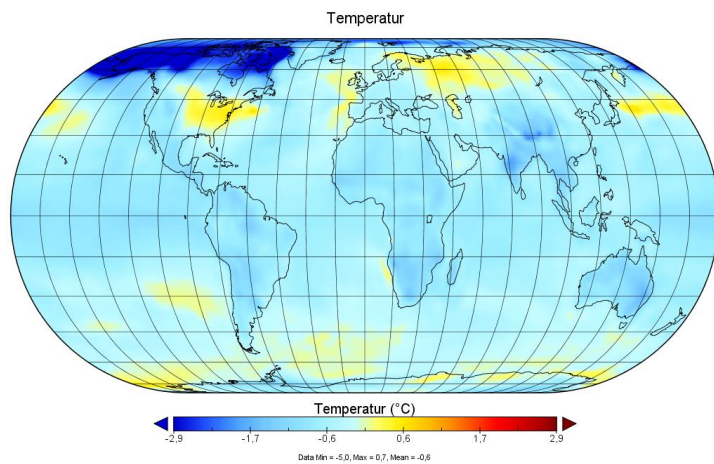


Abb. 5.1: Temperaturdifferenz in dem Zeitraum 2050-2069 mit Aerosolen im Vergleich zu ohne Aerosole im Winter der Nordhalbkugel