

AEROSOLE – KÖNNEN SIE DAS KLIMA RETTEN?

QUENTIN KELLER, HENRI REHAGE 2015

Die Frage der Klimarettung stellt sich tagtäglich ó sind Aerosole die Lösung? Inwiefern beeinflussen sie aktiv unsere Strahlungsbilanz?

Inhalt

1	Vorwort	1
2	Aerosole	2
	2.1 Was sind Aerosole?	2
	2.2 Wie entstehen Aerosole?	3
	2.3 Aerosole als Climate Engineering Methode	3
3	Auswirkungen	5
	3.1 Auswirkungen von Aerosolen auf unser Klima	5
	3.2 Globale Klimaauswirkungen von Aerosolen	5
4	Temperaturentwicklung nach Einsetzung der Aerosole	9
	4.1 Temperatur 1961 – 1990	9
	4.2 Temperaturanstieg 1961 – 1990 bis 2050 – 2069	9
	4.3 Unterschied der Temperatur ohne und mit Aerosoleinsatz.....	10
	4.4 Auswertung	11
5	Konzentrationsszenarien	12
	5.1 Methan und Distickstoff	12
	5.2 Aerosole	13
6	Pro und Kontra	14
	6.1 Pro – Kontra Liste	14
	6.3 Fazit	14
7	Quellen	16

AEROSOLE – KÖNNEN SIE UNSER KLIMA RETTEN?

Vorwort

Der Klimawandel hat anthropogene und natürliche Ursachen und Aerosole spielen unserer Meinung nach darin eine große Rolle. Wir haben uns deshalb das Thema „Aerosole als Climate-Engineering-Methode“ mit der Leitfrage „Inwiefern beeinflussen Aerosole aktiv unsere Strahlungsbilanz?“ ausgesucht.

In dieser Forschungsarbeit werden wir daher genau auf den Einfluss von Aerosolen auf unser Klima, die daraus entstandenen Probleme und Vorteile, sowie die Ausbringung von Aerosolen in der Stratosphäre als sogenannte Climate-Engineering-Methode eingehen. Die Ausbringung von Aerosolen in der Stratosphäre ist zurzeit eine der kostengünstigsten und effektivsten Methoden, um aktiv die Strahlungsbilanz der Atmosphäre zu unseren Gunsten zu „verbessern“.

Aus diesem Grund haben wir uns entschlossen dieses Thema zu wählen.

AEROSOLE – KÖNNEN SIE UNSER KLIMA RETTEN?

Aerosole

WAS SIND AEROSOLE?

Aerosole sind feste oder flüssige Teilchen, die in der Luft schweben. Sie können sowohl erwärmend als auch abkühlend auf das Klima wirken: So sind sie einerseits in unserem Strahlungshaushalt die Gegenspieler der Treibhausgase. Aerosole sind höchstwahrscheinlich dafür verantwortlich, dass insbesondere der anthropogene, vom Menschen verursachte Klimawandel, deutlich abgeschwächt wurde. Das liegt daran, dass bestimmte Aerosole die kurzwellige, solare Strahlung reflektieren und so die untere Atmosphäre kühlen. Auf langwellige Strahlung haben Aerosole jedoch kaum einen Einfluss. Andererseits beeinflussen vor allem anthropogene Aerosole die Oberflächenalbedo, also das Reflexionsvermögen, der Erde, indem sie sich auf Oberflächen absetzen, Strahlung absorbieren, sich aufheizen und zu einem Abschmelzen von beispielsweise Eisoberflächen führen. Das sich unter diesen befindliche Meer oder die Erdoberfläche absorbieren deutlich mehr (80 bis 90 %) der Solarstrahlung als Eis- oder Schneeschichten; dies reflektieren bis zu 90 %. Dieser Prozess führt also zu einer Erwärmung der Erdoberfläche und somit auch der unteren Luftschichten, was wiederum zu einem stärkeren Abschmelzen von Eisschichten führt. Man spricht hier von der Eis-Albedo-Rückkopplung. Somit führen Aerosole auch zur Klimaerwärmung und können dem Menschen zusätzlich in Form von inhaliertem Ruß gesundheitlich schaden. In der Atmosphäre sind Aerosole außerdem notwendig für Kondensationsprozesse. Sie dienen als Kondensationskeime für Wolken und Eiskristalle, da sich Wassertröpfchen an sie heften.

Aerosole sind zwischen einem 1 nm und 100 µm groß. Unterschieden wird zwischen ultrafeinen Partikeln mit weniger als 0,1 µm Durchmesser, feinen Partikeln mit 0,1-2,5 µm und groben Partikeln mit über 2,5 µm. Ultrafeine Partikel können innerhalb weniger Stunden durch die sogenannte Koagulation mit anderen Teilchen zu größeren Partikeln heranwachsen. Grobe Partikel sedimentieren sehr schnell und verweilen daher nur wenige Minuten bis hin zu einem Tag in der Atmosphäre. Die feinen Partikel können (auch Akkumulationsmodus genannt) im Durchschnitt eine Woche in der Atmosphäre verweilen. Sollten diese Partikel in besonders große Höhen (wie die Stratosphäre) getragen werden, wie z.B. durch Flugzeugabgase, können sie dort sogar bis zu drei Jahre verweilen. Feine Aerosole werden hauptsächlich durch Niederschlag aus der Atmosphäre entfernt.

WIE ENTSTEHEN AEROSOLE

Aerosole können rein natürlich z.B. durch Wind oder Vulkanausbrüche in unsere Atmosphäre gelangen oder vom Menschen verursacht werden, wie z.B. durch die Verbrennung von fossilen Brennstoffen.

Man unterscheidet zwischen primären und sekundären Aerosolen. Primäre Aerosole gelangen direkt als Partikel in die Atmosphäre wie z.B. Mineralstaub in Wüsten durch

AEROSOLE – KÖNNEN SIE UNSER KLIMA RETTEN?

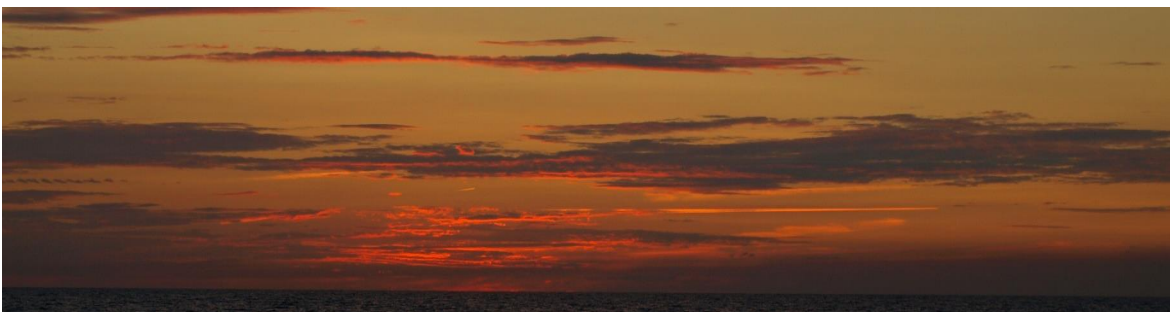
Wind, Seesalzaerosole aus dem Meer und Ruß aus Verbrennungsprozessen in Industriegebieten oder tropischen Wäldern.

Sekundäre Aerosole entstehen erst durch chemische Prozesse in der Atmosphäre. Auf diese Weise entstehen z.B. Sulfataerosole. Das durch anthropogene und natürliche Verbrennungsprozesse entstandene Schwefeldioxid gelangt durch Wind in die Atmosphäre und reagiert dort mit anderen chemischen Stoffen zu einem Sulfataerosol. Obwohl die Luftreinhaltegesetze in der westlichen Welt für einen Rückgang der Schwefelemissionen gesorgt hat, steigen die Ausstöße in Asien.

AEROSOLE ALS CLIMATE – ENGINEERING – METHODE

Aerosole können als Climate-Engineering Methode genutzt werden, um den Klimawandel abzubremesen. Dieses Konzept entstand bei der Beobachtung von den Auswirkungen der Vulkaneruptionen auf die Temperatur in der Atmosphäre. Die durch Vulkane emittierten Schwefeldioxide werden in der Stratosphäre, wie schon beschrieben, in Sulfat-Aerosole umgewandelt und reflektieren dort kurzweilige Strahlung, was zu einem Rückgang der Sonneneinstrahlung auf die Erde führt. Weitere mögliche Reaktionspartner für die Entstehung von Sulfataerosolen, außer Schwefeldioxid, sind z.B. Schwefelsäure, Dimethylsulfid, Carbonylsulfid und Schwefelwasserstoff. In die Atmosphäre gelangen diese entweder durch gezielte Schüsse in die Atmosphäre mit Hilfe von Artillerie, durch den Transport mit hochfliegenden Großraumflugzeugen oder mit Hilfe von unbemannten Stratosphärenballons. Diese Flugzeuge müssen mindestens 11 km (an den Polen) bzw. 17 km (am Äquator) hochfliegen können, um die Stratosphäre zu erreichen. Der Klimawissenschaftler Tom Wigley ist der Meinung, dass, wenn z.B. Schwefeldioxid alle ein bis vier Jahre in der Menge des Vulkanausbruchs des Pinatubo 1991 in der Stratosphäre verteilt wird und diese Methode für technologisch, ökologisch und ökonomisch rentabel befunden würde, eine Schonfrist für bis zu 20 Jahre entstehen könnte, bevor größere Einschnitte in unseren Treibhausgasemissionen vollzogen werden müssten.

Optisch lässt sich durch Sulfat-Geoengineering möglicherweise eine stärkere rötliche Färbung des Sonnenuntergangs erkennen (Abb.), wie 1991 beim Ausbruch des Pinatubo. Tagsüber würde der Himmel dann milchig weiß gefärbt wirken. Einen tiefblauen Himmel gäbe es diesem Fall nicht mehr.



Quelle der Abb.: Foto von Ulrike Niemeier, Genehmigung durch die Fotographin Mail 11.2. an Lina Teckentrup

AEROSOLE – KÖNNEN SIE UNSER KLIMA RETTEN?

Auswirkungen

AUSWIRKUNGEN VON AEROSOLEN AUF UNSER KLIMA

Aerosole beeinflussen unser Klima global und regional. Auf Grund ihrer kurzen Lebensdauer sind sie regional sehr unterschiedlich zusammengesetzt und verteilt. Grundsätzlich wird zwischen direktem und indirektem Einfluss auf unser Klima unterschieden, sowie dem semidirekten Einfluss.

Dieser Einfluss (bzw. die positiven oder negativen Änderungen in der Energiebilanz) wird auch als Strahlungsantrieb bezeichnet. Dieser wird in W/m^2 angegeben.

Der direkte Strahlungsantrieb der Aerosole wirkt auf bodennahe Luftschichten abkühlend und kann auf Schichten an der Obergrenze der Atmosphäre abkühlend, aber auch erwärmend wirken, da anthropogen verursachte Aerosole wie z.B. Ruß kurzwellige Strahlung absorbieren, sich so erhitzen und dann Wärme in die Atmosphäre abstrahlen. Sulfataerosole reflektieren hingegen zu einem Großteil. Da der Effekt der Reflexion bereits an der Obergrenze der Atmosphäre eintritt, kühlen sich die bodennahen Schichten nur ab.

Der indirekte Effekt bezieht sich auf die Bildung von Wolken und Eiskristallen, in denen Aerosole als Kondensationskerne wirken. Dieser Effekt wirkt wahrscheinlich auch abkühlend, da Wolken die kurzwellige Strahlung ebenfalls reflektieren, doch der Kenntnisstand über diesen Effekt ist noch geringer als beim direkten Einfluss.

Der semidirekte Strahlungsantrieb wirkt auf die bodennahen, sowie die sich an der Obergrenze der Atmosphäre befindenden Luftmassen nur erwärmend. Die Rußpartikel heizen sich durch die Absorption auf und verursachen die Auflösung der Wolkenmassen. Durch diesen Prozess wird die Atmosphäre durchlässiger für die kurzwellige solare Strahlung.

GLOBALE KLIMAAUSWIRKUNGEN VON AEROSOLEN

Die genauen globalen Auswirkungen von Aerosolen auf das Klima sind schwierig abzuschätzen, haben möglicherweise aber die Erwärmung halbiert: Nach Berechnungen des Max-Planck-Instituts für Meteorologie beträgt die durchschnittliche Abkühlung der mittleren bodennahen Luftschichten durch Aerosole $0,9\text{ °C}$ bezogen auf die Differenz der Temperaturen 1860 (zum Anfang der industriellen Revolution) und 1985.

Die Temperatur der Luftschichten hat sich insgesamt zwar um $0,6\text{ °C}$ bis $0,7\text{ °C}$ erhöht, der vom IPCC errechnete Temperaturanstieg durch Treibhausgase beträgt aber 1 °C bis $1,6\text{ °C}$. Die Differenz muss also zu einem Großteil durch die erhöhte Aerosoldichte in der Atmosphäre verursacht sein. Ein weiterer Faktor ist die Wolkenbildung.

Da die Industrie und Schwellenländer in den nächsten Jahren aber versuchen werden, die Aerosolemissionen zu reduzieren, wird die Durchschnittstemperatur wahrscheinlich wieder ansteigen, was zusammen mit einem erhöhten Treibhausgasanstieg in der Atmosphäre zu einem doppelten Erwärmungseffekt führen könnte. Nach Modellrechnungen würde die Durchschnittstemperatur bis 2030, alleine durch die

AEROSOLE – KÖNNEN SIE UNSER KLIMA RETTEN?

maximal mögliche Reduzierung von Aerosolemissionen bis 2030, um 1 °C steigen. Der dazukommende Effekt der steigenden Treibhausgasemissionen würde zu einem Anstieg von zusätzlich 1,2 °C führen. Der voraussichtliche Temperaturanstieg durch beide Faktoren würde also 2,2 °C bis 2030 betragen. Somit wäre das Ziel der UN-Klimarahmenkonvention, den Temperaturanstieg auf maximal 2 °C gegenüber dem vorindustriellen Wert zu begrenzen, schon vor 2030 gescheitert.

Die folgende Grafik zeigt regionale Klimaänderungen durch anthropogene Aerosole. Berücksichtigt wurde der Temperaturunterschied zwischen 1860 und 1985, verursacht durch den direkten und indirekten Strahlungsantrieb.

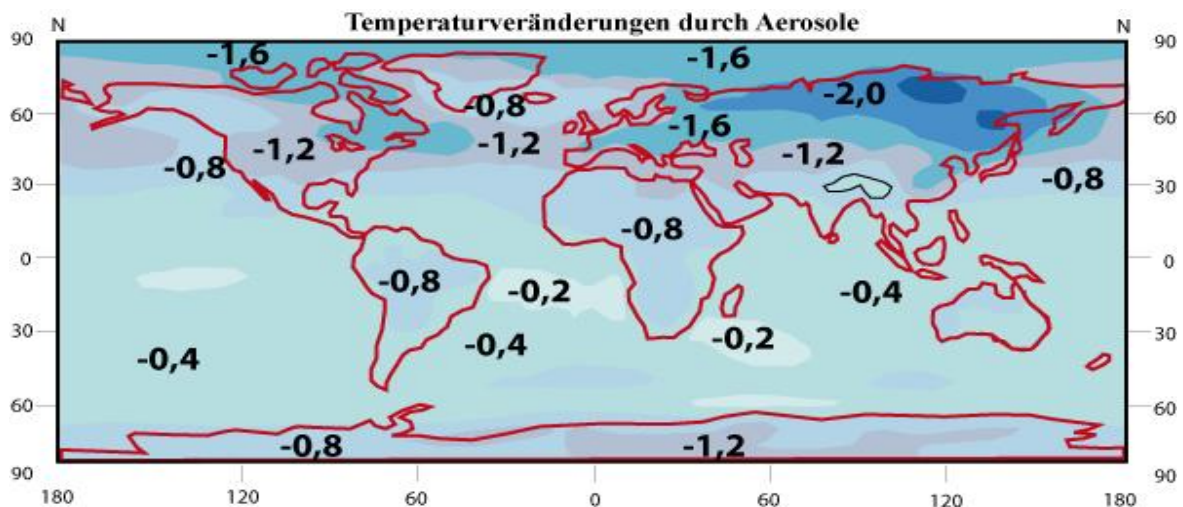


Abbildung 2: Veränderung der mittleren bodennahen Temperatur im Vergleich zum vorindustriellen Wert durch anthropogene Aerosole nach einer Modellrechnung des Hamburger Max-Planck-Instituts. Berücksichtigt ist der direkte und der indirekte Aerosol-Effekt.

Quelle: Dieter Kasang, Globale klimatische Wirkung von Aerosolen. Verändert nach Feichter, J., E. Roeckner, U. Lohmann, and B. Liepert (2004): Nonlinear Aspects of the Climate Response to Greenhouse Gas and Aerosol Forcing, *Journal of Climate* 17, 2384-2398, <http://bildungsserver.hamburg.de/aerosole/nofl/2533646/aerosole-globale-wirkung-artikel/>

Der deutliche Effekt über Sibirien ist durch die dortigen Eis- und Schneemassen zu begründen. Diese vergrößern sich durch die fehlende Sonneneinstrahlung sehr stark, was wiederum durch die hohe Albedo von Schnee und Eis eine weitere Abkühlung zur Folge hat. In den wenig verschmutzten Gebieten über dem Pazifik ist der Temperaturanstieg dementsprechend gering. Der Erwärmungseffekt durch Treibhausgase übertrifft den Abkühlungseffekt durch Aerosole jedoch in allen Regionen deutlich.

Folgende Graphik stellt, abhängig vom Breitengrad, die Temperaturveränderungen durch Aerosole in der Atmosphäre, zwischen vorindustriellen Werten und der Gegenwart, dar.

AEROSOLE – KÖNNEN SIE UNSER KLIMA RETTEN?

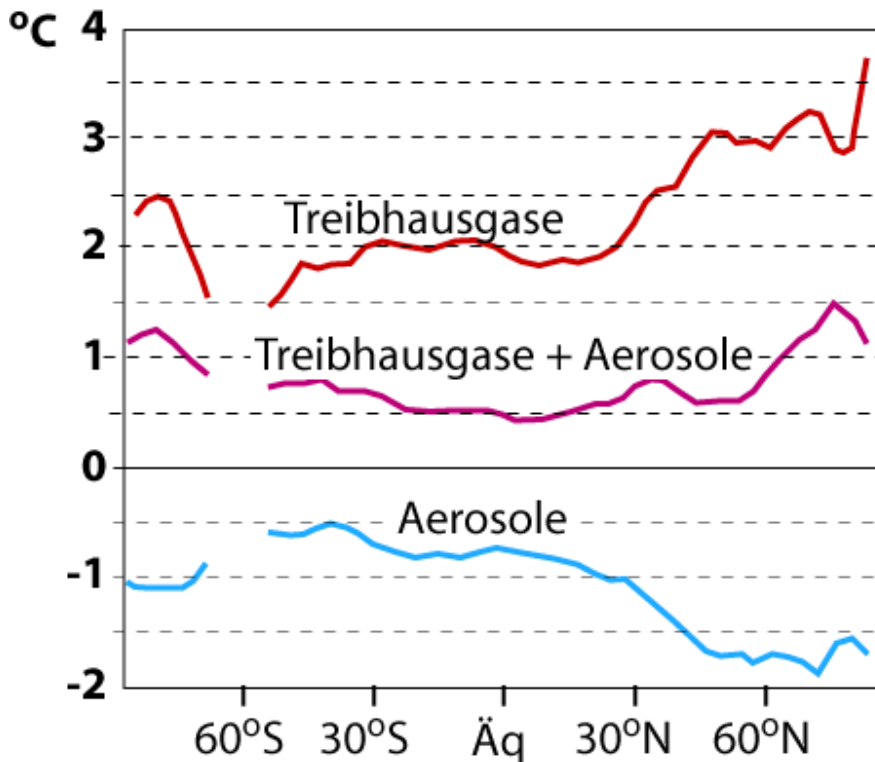


Abbildung 3: Modellsimulation der zonalen Temperaturdifferenz zwischen dem vorindustriellen Wert (0 °C) und der Gegenwart durch den Effekt von Treibhausgasen allein (obere Kurve), Aerosole allein (untere Kurve) und durch anthropogene Treibhausgase und Aerosole (mittlere Kurve) über Land. Quelle: Dieter Kasang, Globale klimatische Wirkung von Aerosolen. Verändert nach Feichter, J., E. Roeckner, U. Lohmann, and B. Liepert (2004): Nonlinear Aspects of the Climate Response to Greenhouse Gas and Aerosol Forcing, *Journal of Climate* 17, 2384-2398 <http://bildungsserver.hamburg.de/aerosole/nofl/2533646/aerosole-globale-wirkung-artikel/>

Klar erkennbar ist der Temperaturanstieg von bis zu 4 °C durch Treibhausgase, insbesondere am nördlichen Polarkreis. Gemischt mit Aerosolen ist der Anstieg zwar noch vorhanden, aber schon abgeschwächt. Würden in der Atmosphäre hingegen nur Aerosole vorhanden sein, würde eine spürbare Temperaturreduzierung, insbesondere um den nördlichen Polarkreis, entstehen.

Obwohl die Temperatur im 20. und 21. Jahrhundert stark angestiegen ist, hat sich die Sonneneinstrahlung von 1960 bis 1970 um 4 % verringert, was zum einen auf eine erhöhte Wasserverdunstung durch mehr anthropogene Treibhausgase schließen lässt und zum anderen auf einen Anstieg der anthropogenen Aerosole in der Atmosphäre, die eine erhöhte Wolkenbildung verursachen.

Rund 2,2 % der globalen Reduktion entfallen auf die Wolkenbildung durch Aerosole. In der folgenden Grafik ist der Rückgang der Sonneneinstrahlung von 1958 auf 1992, insbesondere um den 30 °N und den 20 °S, erkennbar.

AEROSOLE – KÖNNEN SIE UNSER KLIMA RETTEN?

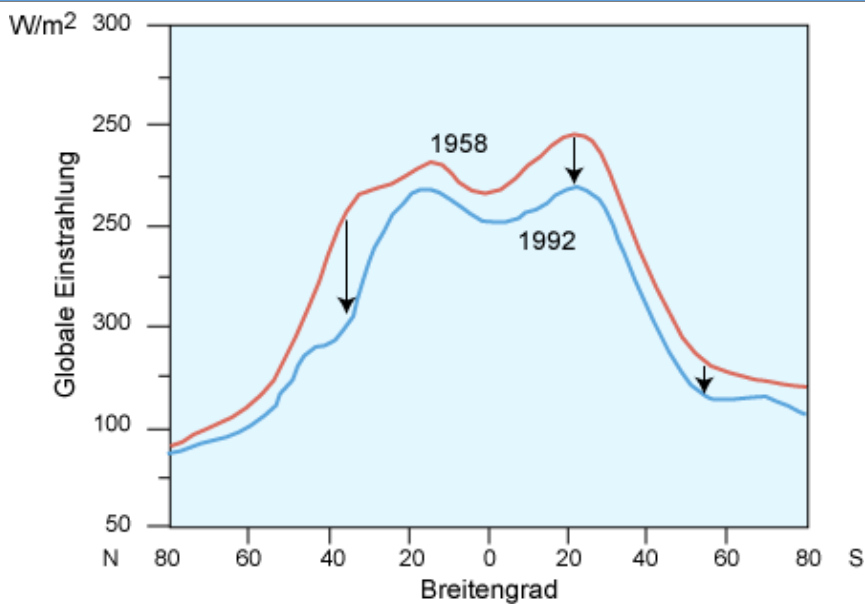


Abbildung 4: Die globale Sonneneinstrahlung am Boden 1958 und 1992 nach der geographischen Breite. Quelle: Dieter Kasang, Globale klimatische Wirkung von Aerosolen. Verändert nach Stanhill, G., S. Cohen (2001): Global dimming: a review of the evidence for a widespread and significant reduction in global radiation with discussion of its probable causes and possible agricultural consequences, *Agricultural and Forest Meteorology* 107, 255-278
<http://bildungsserver.hamburg.de/aerosole/nofl/2533646/aerosole-globale-wirkung-artikel/>

Die globale Durchschnittstemperatur hat sich stärker erhöht als der Anstieg, der allein durch Aerosole und Treibhausgase beeinflusst wird. Es müssen also weitere Faktoren eine Rolle spielen; Beispiele hierfür wären die Solarvariabilität und Vulkaneruptionen. Letzteres bezieht sich zum Teil auch auf die Auswirkungen von Aerosolen, da diese auch bei einem Vulkanausbruch entstehen.

AEROSOLE – KÖNNEN SIE UNSER KLIMA RETTEN?

Temperaturentwicklung nach Einsetzung der Aerosole

Die folgenden Darstellungen der Temperatur(änderungen) beruhen auf Daten aus einer Veröffentlichung von Ulrike Niemeyer und Hauke Schmidt aus 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/WDC/ui/Compact.jsp?acronym=DKRZ_Ita_695

TEMPERATUR 1961 – 1990

In der folgenden Darstellung sind die durchschnittlichen Jahrestemperaturen der Jahre 1961 bis 1990 zu sehen. Deutlich erkennbar sind die starken Temperaturunterschiede zwischen dem äquatorialem Gebiet und den Polargebieten.

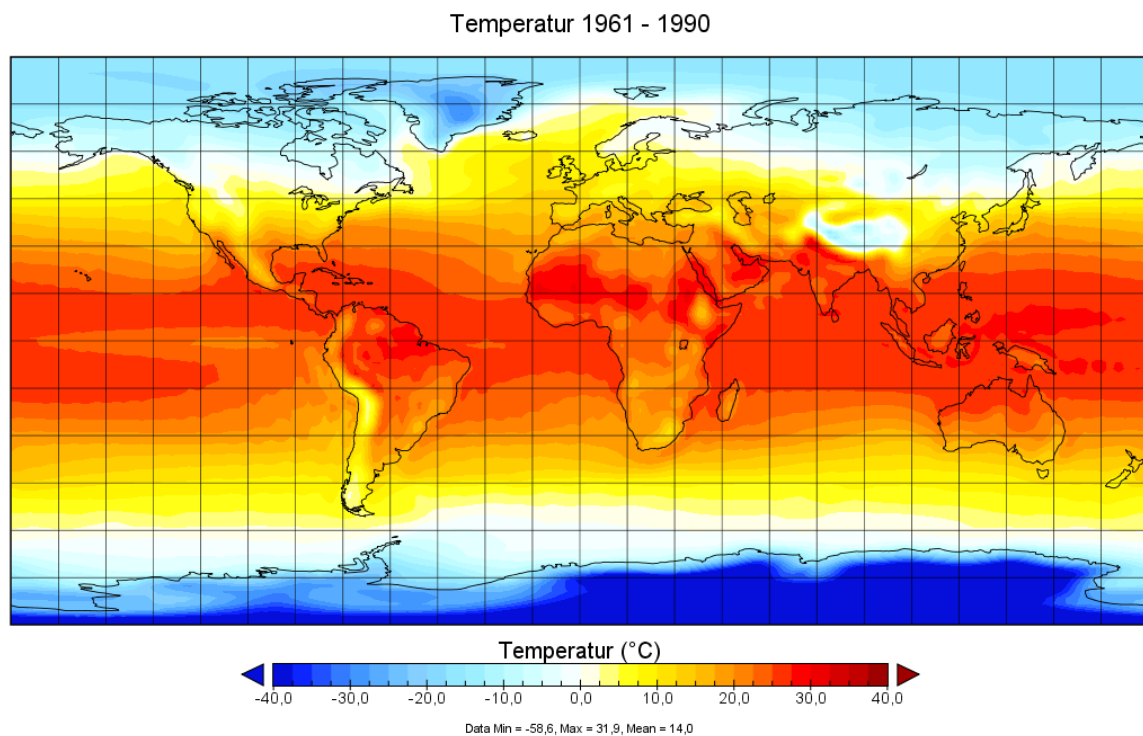


Abbildung 5: Temperaturverteilung für den Zeitraum 1961 bis 1990.

TEMPERATURANSTIEG 1961 – 1990 BIS 2050 – 2069

Die folgende Grafik zeigt anschaulich den Temperaturanstieg der Durchschnittsjahrestemperatur in 2050 – 2069 im Vergleich zu 1961 – 1990. In den Daten der Jahre 2050 – 2069 wurde der Einsatz künstlicher Aerosole in der Stratosphäre mit eingerechnet. Auffällig ist ein starker Anstieg der Durchschnittstemperatur in der Barentssee nördlich von Russland. Auch auffällig ist ein sehr kleiner bzw. kein Anstieg der

AEROSOLE – KÖNNEN SIE UNSER KLIMA RETTEN?

Temperatur im Südpazifik, im Südatlantik, im südlichen Indischen Ozean und im Nordatlantik südlich von Grönland bis an die nord - westliche Spitze der Iberischen Halbinsel.

Temperaturanstieg von 1961 - 1990 bis 2050 - 2069 mit Aerosolen

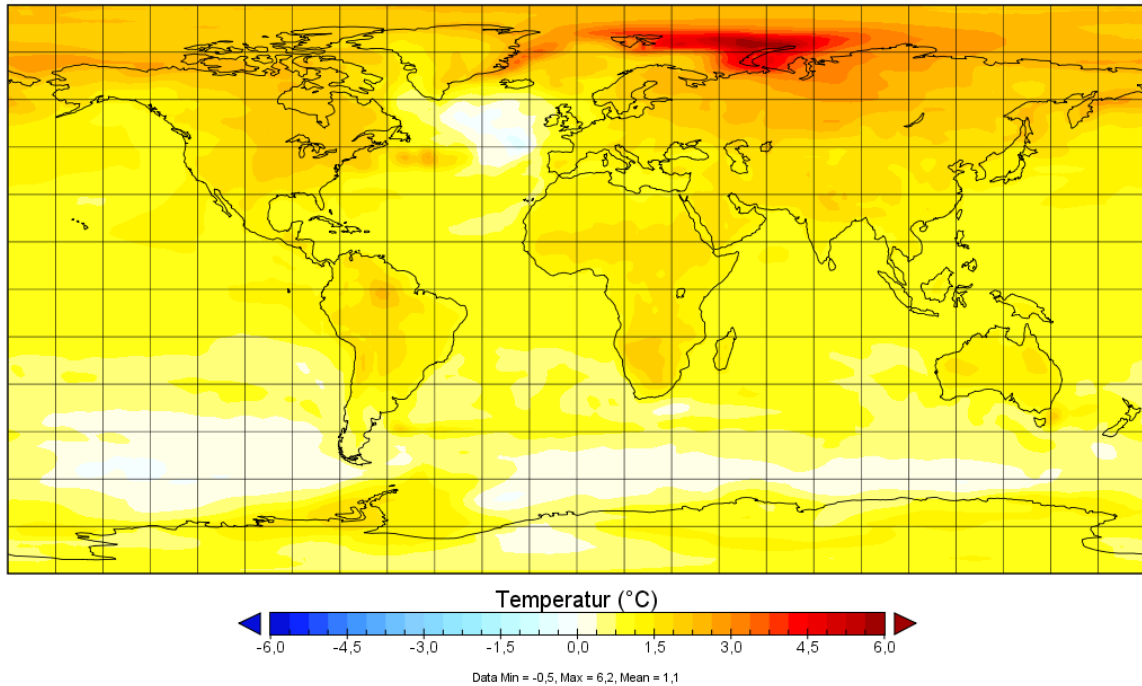


Abbildung 6: Änderung der Temperaturverteilung mit Aerosoleinsatz im Zeitraum 2050 – 2069 im Vergleich zu 1961 – 1990.

UNTERSCHIED DER TEMPERATUR OHNE UND MIT AEROSOLEINSATZ

Die folgende Grafik stellt den Unterschied der Jahresdurchschnittstemperatur der Jahre 2050 – 2069 mit dem Einsatz künstlicher Aerosole und ohne dar. Auffällig ist hier, dass bei Alaska die Durchschnittstemperatur durch die Aerosole deutlich niedriger wäre, als ohne Aerosole. Davon profitieren auch Südamerika, Afrika, Australien und Südasiens sowie die gesamte Nordpolar-Region.

AEROSOLE – KÖNNEN SIE UNSER KLIMA RETTEN?

Der von Aerosolen gebrachte Temperaturunterschied 2050 - 2069

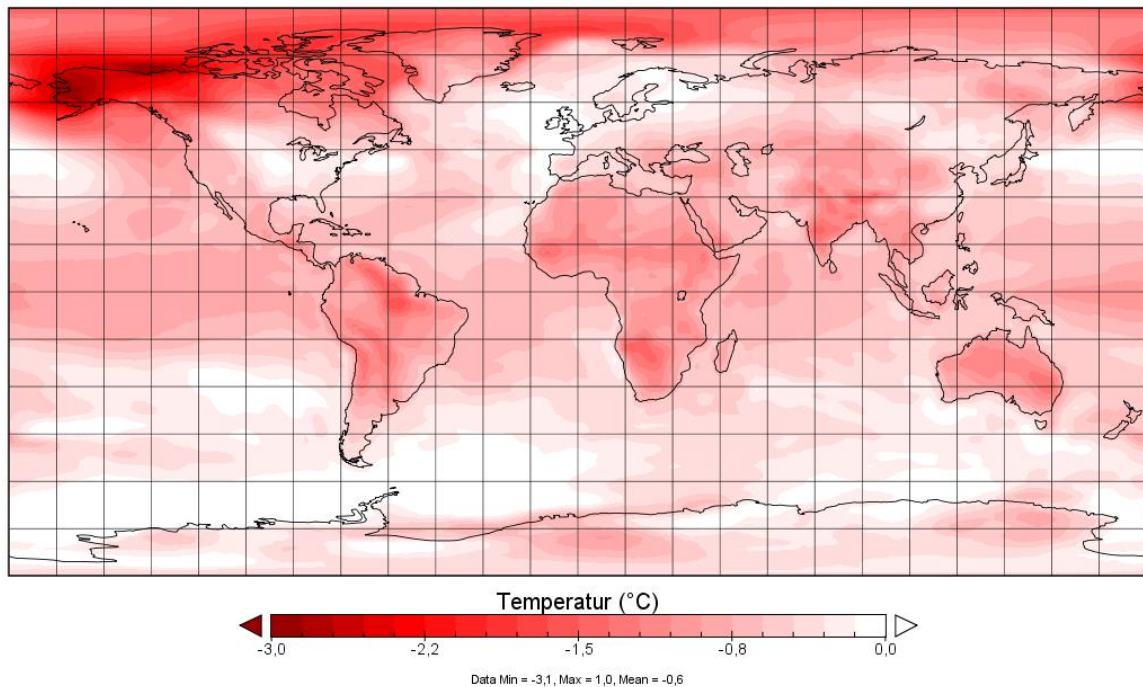


Abbildung 7: Änderung der Temperatur im Zeitraum 2050 – 2069. Gezeigt wird die Differenz zwischen einem Zukunftsszenario mit und einem ohne Aerosoleinsatz.

AUSWERTUNG

Die Grafiken zeigen eindrucksvoll, dass Aerosole tatsächlich unser Klima in Form von Temperatursenkungen zu unseren Vorteilen beeinflussen können. Die Welt würde durch Aerosole im Durchschnitt 0,6 °C weniger warm werden. Die Frage bleibt, was für einen Stellenwert man 0,6 °C in Hinblick auf mögliche Risiken und Kosten gibt.

AEROSOLE – KÖNNEN SIE UNSER KLIMA RETTEN?

Konzentrationszenarien

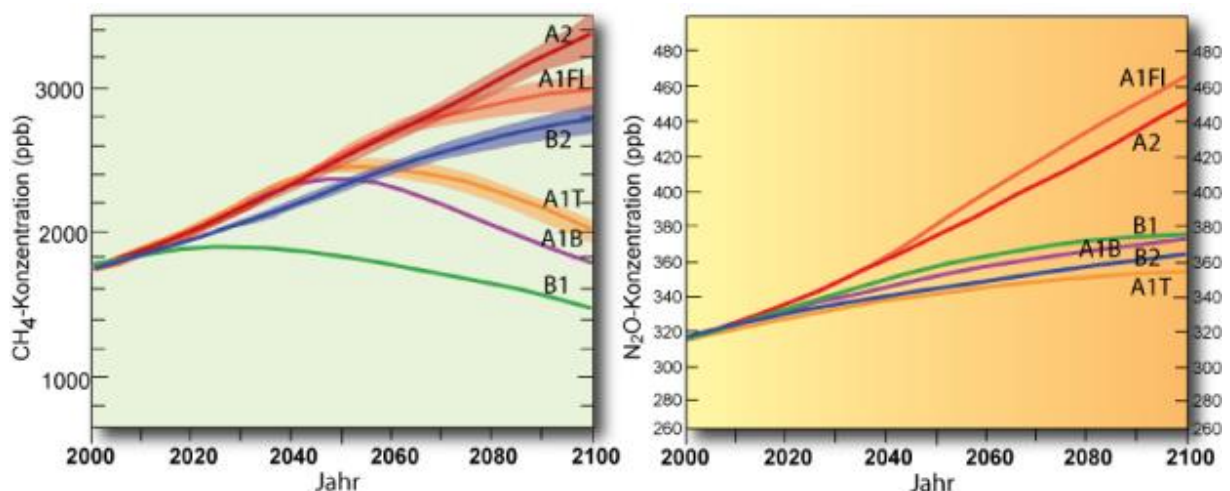
METHAN UND DISTICKSTOFF

Methan (CH_4) ist ein Treibhausgas, dessen Konzentration gegenwärtig zwischen 1800 und 2000 ppb (parts per billion) liegt und damit dem CO_2 mit einer Konzentration von 387 ppm (Stand: 2009, gemessen auf Hawaii) deutlich unterlegen ist. Dennoch ist Methan nicht zu unterschätzen: Methan hat laut Experten, die am „Global Warming Potential“ forschen, die 21- bis 25-fache Wirkung als Treibhausgas im Vergleich zu CO_2 . Außerdem reagiert Methan mit Schwefeldioxid, was zur Folge hat, dass Schwefeldioxid nicht zu m Sulfataerosolen werden kann (siehe 1.1). Das bedeutet außerdem, dass eine zusätzliche Erwärmung stattfindet.¹

Methan wird durch die Erderwärmung freigesetzt. Permafrostböden tauen auf und setzen Methan frei, bei 2 °C Erwärmung und 10 % mehr Niederschlägen rechnen Forscher mit 21% mehr Methanemissionen aus Feuchtgebieten. Gleichzeitig steigt die Konzentration von Hydroxid durch steigende Temperaturen, welches Methan aus der Atmosphäre entfernen kann.²

Ein weiteres Treibhausgas ist Distickstoff, welches als Lachgas bekannt ist. Lachgas hat eine geringere Konzentration in der Atmosphäre als Methan und Kohlenstoffdioxid (310 - 330 ppb). Distickstoff wird als Bestandteil von Düngemitteln in der Landwirtschaft eingesetzt. Durch das vermehrte Wachstum der Pflanzen steigt auch die Photosyntheserate und es wird mehr CO_2 in O_2 umgewandelt. Allerdings kann der Distickstoff auch aus dem Boden austreten und als starkes Treibhausgas in die Atmosphäre gelangen. Laut eines Forscherteams am Max – Planck – Institut für Meteorologie überwiegt der negative Effekt des Distickstoffes.³

Die folgenden Grafiken zeigen sechs Szenarien zu Methan- und Distickstoffkonzentrationen. Drei der sechs Szenarien zu der Methankonzentration zeigen nach dem Erreichen der ~2500 ppb-Marke ein Sinken der Konzentration, die durch mehr Hydroxid bei steigender Temperatur begründet werden kann.



AEROSOLE – KÖNNEN SIE UNSER KLIMA RETTEN?

Abbildung 8: Methan- und Distickstoffkonzentrationen 2000-2100 nach verschiedenen IPCC-Szenarien. Quelle: Dieter Kasang Konzentrationsszenarien sonstiger Treibhausgase und Aerosole, verändert nach IPCC (2007): Climate Change 2007, Working Group I: The Science of Climate Change, Figure 10.26 <http://bildungsserver.hamburg.de/zukuenftige-antriebskraefte/2081540/konzentration-treibhausgase-artikel/>

AEROSOLE

Für die Konzentration der Sulfataerosole ist eine ähnliche Entwicklung wie die Methankonzentration wahrscheinlich: Zum Ende des Jahrhunderts könnte die Konzentration, aufgrund von besseren und saubereren Methoden zur Energiegewinnung, sinken. Wird jedoch künstlich die Menge an Aerosolen in der Stratosphäre erhöht, können sie sich, durch ihre reflektierende Wirkung, den steigenden CO₂ Werten entgegenstellen, dank sinkender Methan Werte zum Jahrhundertsende.

AEROSOLE – KÖNNEN SIE UNSER KLIMA RETTEN?

Pro und Kontra

<i>Pro</i>	<i>Kontra</i>
Geringe Kosten von ca. 250 Millionen USD ⁴ jährlich	Verstärkung von Saurem Regen
Sonneneinstrahlung und damit Temperatur wird effektiv gesenkt	Der Himmel würde seine charakteristische blaue Farbe verlieren
Günstige Alternative zu teuren CO ₂ -Emissions-Reduzierungen	Das „echte“ Problem des zu hohen CO ₂ -Ausstoßes wird nicht bekämpft
Notwendige Alternative, da CO ₂ -Ausstoß nicht genug eingeschränkt wird	Katastrophale Folgen bei Fehlern verschiedener Art (z.B.: Albedo-Reduzierung)
	Großes Konfliktpotenzial der einzelnen Nationen über die Kontrolle und Kostendeckung

FAZIT

Nach eingehender Betrachtung der Vor- und Nachteile von Aerosolen als Climate-Engineering Methode kommen wir zu dem Ergebnis, dass Aerosole prinzipiell eine gute Möglichkeit darstellen, den seit der industriellen Revolution entstandenen Treibhausgasanstieg in der Atmosphäre zu relativieren. Sie beeinflussen die Strahlungsbilanz durch Reflexion und Absorption sehr stark. Da die weltweiten Aerosolemissionen in den nächsten Jahren aber voraussichtlich sinken werden und die Aerosole in der Atmosphäre auf Grund ihrer kurzen Lebensdauer in Relation zu Treibhausgasen schnell beginnen zu sedimentieren, muss der Mensch manuell Aerosole in der Stratosphäre verteilen (siehe 1.2). Aerosole haben aber auch Nachteile, insbesondere Aerosole, die durch den Menschen ausgestoßen wurden. Sie verschmutzen den Luftraum, verhindern so einen strahlenden blauen Himmel, sorgen, als Ruß, für Gesundheitsprobleme, verursachen sauren Regen und reduzieren die Albedo, was zu einer Eis-Albedo-Rückkopplung führt (Siehe 1.1).

Außerdem könnte die Kostenverteilung ein großer Konfliktpunkt zwischen den beteiligten Staaten werden; schon heute können sich Politiker ja schon nicht auf Emissionsziele einigen. Daher werden sich in den nächsten Jahren weitere Diskussionen über das Thema "Klimaschutz" entwickeln. Denn eine Ursache des Klimawandels können selbst Aerosole nicht ewig relativieren: Den Anstieg der Konzentration von Treibhausgasen in der Atmosphäre.

AEROSOLE – KÖNNEN SIE UNSER KLIMA RETTEN?

Quellen

Abb. Titelseite: Asian Dust, NASA; Autor: Image courtesy the SeaWiFS Project, NASA/Goddard Space Flight Center, and ORBIMAGE

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Asian_Dust,_NASA_aerospace_photograph_y.jpg; This work has been released into the [public domain](#) by its author, [GeoEye](#)

Herminghaus, H.: CO₂-Konzentration in der Luft. Quelle: <http://www.co2-emissionen-vergleichen.de/Klimabilanz/Treibhausgase/CO2/CO2-Konzentration-Luft.html> (Zugriff: 08.11.2015)

Kasang, D.: Aerosole. Quelle: <http://wiki.bildungserver.de/klimawandel/index.php/Aerosole> (Zugriff 10.02.2016)

Kasang, D.: Globale klimatische Wirkung von Aerosolen. Quelle: <http://bildungserver.hamburg.de/aerosole/nofl/2533646/aerosole-globale-wirkung-artikel/> (Zugriff 10.02.2016)

Kasang, D.: Die klimatische Wirkung von Aerosolen. Quelle: <http://bildungserver.hamburg.de/treibhausgase/2533656/aerosole-klimawirkung-einleitung-artikel/> (Zugriff 10.02.2016)

Kasang, D.: Konzentrationsszenarien sonstiger Treibhausgase und Aerosole. Quelle: <http://bildungserver.hamburg.de/zukuenftige-antriebskraefte/2081540/konzentration-treibhausgase-artikel/> (Zugriff: 08.11.2015)

mitmischen.de – Das Jugendportal des Deutschen Bundestages: Pro und Contra: Geo-Engineering. Quelle: http://www.mitmischen.de/diskutieren/topthemen/politikfeld_umwelt/geoengineering/streitgesprach_geoengineering/index.jsp (Zugriff: 08.11.2015)

Niemeier, U.: Sulfat Geoengineering - Emissionen von SO₂ in der Stratosphäre. Quelle: <http://www.mpimet.mpg.de/mitarbeiter/ulrike-niemeier/geoengineering/sulfat-geoengineering.html> (Zugriff 10.02.2016)

Seidler, C.: Weltklima: Methan wirkt gefährlicher als angenommen. Quelle: <http://www.spiegel.de/wissenschaft/natur/weltklima-methan-wirkt-gefaehrlicher-als-angenommen-a-658141.html> (Zugriff: 08.11.2015)

Wikipedia: Geoengineering. Quelle: <https://de.wikipedia.org/wiki/Geoengineering> (Zugriff: 08.11.2015)

Wikipedia: Stratospheric sulfate aerosols (geoengineering). Quelle: [https://en.wikipedia.org/wiki/Stratospheric_sulfate_aerosols_\(geoengineering\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Stratospheric_sulfate_aerosols_(geoengineering)) (Zugriff 10.02.2016)

Zaehle, S., Ciais, P., Friend, A. D. Und Prieur, V. (2011): Carbon benefits of anthropogenic reactive nitrogen offset by nitrous oxide emissions. Nature Geoscience 4, 601–605