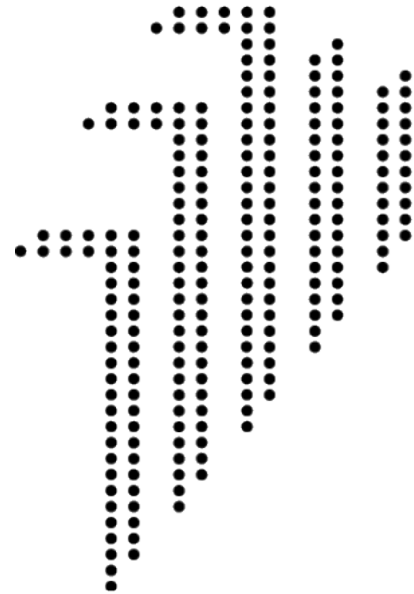


h_da

HOCHSCHULE DARMSTADT
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

fb

FACHBEREICH
BAUINGENIEURWESEN



Analyse zum Stand der Wissenschaft im Hinblick auf Geoengineering Maßnahmen zur Beeinflussung des Strahlungshaushaltes

Bachelorthesis

vorgelegt von **Frank Fleischer**

Matrikelnummer 728051

Zur Erlangung des akademischen Grades

Bachelor of Engineering

Sommersemester 2016

FACHBEREICH BAUINGENIEURWESEN	
Bachelorarbeit	Studiengang Bauingenieurwesen
SCHWERPUNKT	Wasserwirtschaft und Umwelttechnik
THEMA DER ARBEIT	Analyse zum Stand der Wissenschaft im Hinblick auf Geoengineering Maßnahmen zur Beeinflussung des Strahlungshaushaltes
VERFASSER (IN)	Frank Fleischer
MATRIKELNUMMER	728051
REFERENT	PROF. DR.-ING. Birte Frommer HOCHSCHULE DARMSTADT
KORREFERENT	Prof. Dr.-Ing. Stefan Krause Hochschule Darmstadt
AUSGABEDATUM	04.07.2016
ABGABEDATUM	26.09.2016
<p>Ich versichere hiermit, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die im Quellenverzeichnis angegebenen Quellen benutzt habe. Alle Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus veröffentlichten oder nicht veröffentlichten Quellen entnommen sind, sind als solche kenntlich gemacht. Das gilt auch für Quellen, die ich selbst für andere Zwecke erstellt habe. Die Zeichnungen oder Abbildungen in der Arbeit sind von mir selbst erstellt worden oder mit einem entsprechenden Quellennachweis versehen. Diese Arbeit ist in gleicher oder ähnlicher Form noch bei keiner anderen Prüfung oder Prüfungsbehörde eingereicht worden. Mir ist bekannt, dass ein Täuschungsversuch, der zur Exmatrikulation führen kann, vorliegt, wenn sich die vorstehende Erklärung als unrichtig erweist.</p>	
<p>Datum: <u>20.09.2016</u> Unterschrift des Verfassers/Verfasserin: </p>	
<p>Die Arbeit umfasst 86 Seiten und 2 Pläne/Anlagen</p>	

BACHELORARBEIT

Frank Fleischer

Analyse zum Stand der Wissenschaft im Hinblick auf Geoengineering Maßnahmen zur Beeinflussung des Strahlungshaushaltes

Seit Jahrzehnten werden Forschungen angestellt, wie dem Klimawandel entgegen gewirkt werden kann. Die Reduzierung der Treibhausgasemissionen ist ein Ansatz dabei. Darüber hinaus werden zunehmend auch großskalige technische Maßnahmen diskutiert, die „reparierend“ in das Klimasystem eingreifen sollen. Diese werden unter dem Begriff des Geo- oder auch Climate Engineering zusammengefasst und lassen sich unterscheiden in Maßnahmen zur Entfernung von CO₂ aus der Atmosphäre (Carbon Dioxide Removal, kurz CDR) und Maßnahmen zur Beeinflussung des Strahlungshaushaltes (Solar Radiation Management, kurz SRM). Die Technologien sind derzeit noch nicht ausgereift und sowohl gesellschaftlich als auch politisch wegen der möglichen Risiken sehr umstritten. Eine vom Bundesministerium für Bildung und Forschung beauftragte interdisziplinäre Sondierungsstudie zum Climate Engineering kommt zu dem Schluss, dass hier erhebliche Forschungsdefizite und ein großes gesellschaftliches Konfliktpotenzial bestehen (Rickels et al. 2011).

Ziel der Bachelorarbeit von Herrn Fleischer ist es, den Stand der Wissenschaft über Climate Engineering-Maßnahmen zur Beeinflussung des Strahlungshaushaltes zusammenzutragen und einschließlich der möglichen Risiken und deren Wahrnehmung in Wissenschaft, Politik und Öffentlichkeit zu beschreiben. Die folgenden Arbeitsschritte sind dabei mindestens zu erbringen:

- Allgemeine Darstellung der Problemstellung
- Beschreibung der generellen Ansätze und Einsatzgebiete von Geo- bzw. Climate Engineering Methoden, besonders im Hinblick auf das Solar Radiation Management (SRM)
- Beschreibung der bisherigen Erforschung, Erprobung und Anwendung von SRM-Ansätzen mit besonderem Augenmerk auf die Ausbringung von Aerosolen
- (Mögliche) Auswirkungen der Ausbringung von Aerosolen im Rahmen von SRM z.B. auf den Boden-, Wasser- und Lufthaushalt und auf das Schutzgut Mensch
- Beschreibung weiterer Wirkungen, Nebenwirkungen und Risiken sowie deren Wahrnehmung in Wissenschaft, Politik und Öffentlichkeit
- Interpretation der Ergebnisse und Schlussfolgerung

Die Arbeiten sind in Form eines Erläuterungsberichtes mit allen erforderlichen Anlagen sowie einer Kurzfassung und eines Plakates zu dokumentieren. Die Arbeit ist auch in digitaler Fassung abzugeben. Die im Download-Bereich zu findende Anleitung zum Verfassen einer Abschlussarbeit ist zu beachten.

Ausgabe der Arbeit: 04.07.2016
Kolloquium:

Abgabe der Arbeit: 26.09.2016
wird noch vereinbart

Referent:

Korreferent:

Prof. Dr.-Ing. Birte Frommer
Hochschule Darmstadt

Prof. Dr.-Ing. Stefan Krause
Hochschule

Darmstadt

Kurzfassung

Zum Zwecke dem Klimawandel Einhalt zu gebieten, haben Geoengineering-Technologien zur Beeinflussung des Strahlungshaushaltes (Solar Radiation Management, kurz: SRM) in den letzten Jahren im wissenschaftlichen Diskurs über die Erforschung und Erprobung an Bedeutung gewonnen. Beim SRM handelt es sich um Technologien, die solare Strahlung reflektieren, um eine Abkühlung der Erde zu bewirken. Hervorgehoben wird hierbei aufgrund seiner relativ geringen Kosten und seiner hohen (erwarteten) Effizienz die Ausbringung von Aerosolen (Stratospheric Aerosol Injection, kurz: SAI) zur Erzeugung künstlicher Bewölkung. Stoffe, die hierfür Verwendung finden sollen, sind Aluminium, Barium & Schwefel.

Diese Analyse zum Stand der Wissenschaft zeigt die bisher ermittelten Erkenntnisse über die Effekte dieser Technologie. Verschiedene Ansätze zur Erforschung existieren. Der Ansicht, dass Forschung z. Zt. nur im Rahmen von Modellierungen und Laborexperimenten stattfinden könne stehen z. B. der renommierte Klimaingenieur David W. Keith entgegen, der großskalige Feldexperimente fordert. Koordinierte Forschungsprogramme und Ansätze Feldversuche zu initiieren hat es trotz des Fehlens einer internationalen Regulierung bereits gegeben.

SAI hat einen Einfluss auf die Niederschlagsverteilung. Darüber, wie sich SAI konkret auf die Niederschläge auswirkt bestehen große Unsicherheiten. Der grundsätzlichen Tendenz, dass Niederschlag vermindert wird und Dürren entstehen können wird potenziell zunehmender Niederschlag in anderen Regionen der Erde gegenübergestellt. Die Modellierungen können zudem weder die Dynamik innerhalb der Stratosphäre bei Ausbringung von Aerosolen, noch den Austausch zwischen Tropo- und Stratosphäre ausreichend erfassen. Darüber hinaus können Rückkopplungen auf ökologische Systeme bisher nicht hinreichend konkretisiert werden. Hier herrscht Forschungsbedarf.

Studien zeigen, dass Aluminium aufgrund seiner stofflichen Eigenschaften besser als Schwefel dafür geeignet ist, Sonnenstrahlung zu reflektieren. Über stoffliche Auswirkungen auf Schutzgüter wie Mensch und Umwelt wurden jedoch nur wenige Aussagen getroffen. Anhand dieser Analyse wird dennoch die Toxizität von Aluminium deutlich. Welche Effekte dahingehend auf den menschlichen Organismus folgen, wurde in Studien und Hintergrundpapieren, die das SAI betreffen, kaum erfasst. Auch hinsichtlich der Auswirkungen auf Schutzgüter durch den Fallout sind, vor allem stofflich, deutlichere Ergebnisse erforderlich, um SAI erst bewertbar zu machen. Hervorgehoben werden müssen zudem die Unsicherheiten über die Rückkopplungen der Auswirkungen im Klimasystem bei einem Einsatz von SAI.

Politische Instrumente zur Regulierung oder Koordinierung der vorgeschlagenen SAI Technologie gibt es noch nicht, obwohl einige Regelwerke den Tatbestand des SAI berühren könnten. Ein Regelungsorgan wird in der Klimarahmenkonvention gesehen, um zu gewährleisten, dass mit der potenziellen Erforschung und Einsatz von SAI auch Anstrengungen einhergehen, Treibhausgase zu reduzieren. Die Unsicherheit darüber, wie sich die Aus- und

Nebenwirkungen verteilen würden, erschweren zudem eine mögliche internationale Regulierung einer derart großskaligen Maßnahme.

Zudem herrscht ein großes Defizit bei der Einbindung der Bevölkerung in die Debatte über die Maßnahmen des SRM. Trotz zunehmender Publikationen im letzten Jahrzehnt ist das Bewusstsein für Maßnahmen, mit denen das Klima modifiziert werden kann, gering. Für Deutschland ist davon auszugehen, dass die Akzeptanz für SRM gering sein wird und daher ein hohes Mobilisierungspotential folgen wird. Eine öffentliche Debatte über SAI wird nach dieser Analyse klar befürwortet, um die Chance einzuräumen (Gedanken-)Experimenten frühzeitig Einhalt gebieten zu können.

Ein Teil der Bevölkerung ist durchaus durch sichtbare Phänomene wie Gittermuster von persistenten Kondensstreifen besorgt, denn sie werden mit Patenten, Regenwasser-, Sediment- oder Luftanalysen in einen Kontext gebracht. Deutschland- und europaweit existieren bereits Petitionen, die einen Abbruch von bereits gestarteten Geoengineering Maßnahmen fordern. Auch in den USA gibt es von einer Initiative ausgehende rechtliche Anstrengungen SAI zu unterbinden. Diesen, beispielhaft erwähnten, Unterfangen ist gemein, dass sie voraussetzen, das SAI würde bereits großflächig mittels Flugzeugen eingesetzt werden. Eine Verbindung von, seit Jahrzehnten erkennbaren, Tendenzen das Klima modifizieren zu wollen ist mit ebenfalls lange existierenden Patenten begründet. Zudem wird eine Parallele zu neueren stofflichen Analysen von Regenwasser, Luft und Sediment, die erhöhte Werte der Parameter Aluminium und Barium aufweisen, gesehen. Dies verhärtet den Verdacht, es handele sich bereits um die Anwendung von SAI anhand der vorgeschlagenen Stoffe.

Die wissenschaftliche Literatur hat es für den Zeitraum von 2000 bis 2016 – in dem eine steigende Anzahl an Publikationen zum SRM verzeichnet werden kann – versäumt, diesen Verdacht zu adressieren. Derzeit existieren nur wenige Studien, die sich mit einzelnen Inhaltsstoffen von Flugzeugemissionen und keine einzige die sich mit frischer Emittierung der selbigen auseinandersetzt. Hier sind daher ebenfalls Analysen von offizieller Seite notwendig, um die Frage, ob SAI bereits durchgeführt wird, beantworten zu können. Anhand der Datenlage, die für diese Bachelorarbeit zur Verfügung stand, lässt sich die Frage, ob die Anwendung von SAI(-Experimenten) stattfindet, aufgrund fehlender wissenschaftlicher Daten weder abschließend bejahen noch verneinen. Öffentliche Institutionen sind nun in der Bringschuld, selbst Messungen durchzuführen, die dem Verdacht, dass SAI schon angewendet wird, entweder die Grundlage entziehen oder ihn bestätigen können. Dies könnte zudem Bestandteil einer weiteren Abschlussarbeit sein.

Inhaltsverzeichnis

Erklärung

Aufgabenstellung

Kurzfassung

1	Einführung	1
1.1	Hintergrund und Zielsetzung	1
1.2	Vorgehensweise bei der Bearbeitung.....	2
2	Das Klimasystem der Erde und das Geoengineering / Climate Engineering	4
2.1	Das Klimasystem der Erde.....	4
2.1.1	Zirkulation in der Atmosphäre	4
2.1.2	Klimasensitivität	6
2.1.3	Kipppunkte.....	6
2.2	Geoengineering / Climate Engineering.....	8
2.2.1	Begriffsdefinition	8
2.2.2	Erfordernis zur Erwägung von CE durch verschiedene Akteure	8
2.2.3	Vorgeschlagene Maßnahmen des CE zur Beeinflussung des Strahlungshaushaltes	9
2.2.3.1	Erhöhung der Oberflächenalbedo	11
2.2.3.2	Modifikation von Wolken	11
2.2.3.3	Ausbringung von Aerosolen in die Stratosphäre / Stratospheric Aerosol Injection (SAI)	12
2.2.3.4	Reflektoren im Weltall.....	13
2.2.4	Bestrebungen und Einsätze von CE seit dem Zweiten Weltkrieg	13
3	Stand der Wissenschaft des Solar Radiation Management	16
3.1	Forschung.....	16
3.1.1	Forschungsbestrebungen	17
3.1.1.1	Regulierung und Koordinierung der Forschung.....	17
3.1.1.2	Transparenz der Forschung.....	18
3.1.1.3	Teilnehmer und Finanzierung der Forschung.....	19
3.1.2	Durchgeführte Forschungsprojekte	21
3.2	Patente	22
3.3	Technologische Gegebenheiten von SAI	23
3.3.1	Wirkungsvorgang	23
3.3.2	Diskutierte Aerosolmengen	25
3.4	Verwendete Chemikalien	26
3.4.1	Schwefelverbindungen.....	27
3.4.2	Aluminium.....	28
3.5	Mögliche Auswirkungen / Nebenwirkungen von SAI.....	29
3.5.1	Auswirkungen auf die Atmosphäre.....	30
3.5.2	Auswirkungen auf Ökosysteme der Erde	33

3.5.2.1	Wasserkreislauf der Erde.....	33
3.5.2.2	Bioproduktivität	34
3.5.2.3	Abbruch von SRM Maßnahmen.....	35
3.5.3	Auswirkungen auf den menschlichen Organismus.....	37
3.6	Argumente zum Für und Wider der Forschung und Einsatzbereitschaft	39
3.6.1	Forschung.....	40
3.6.2	Einsatzbereitschaft.....	41
4	Betrachtungsschwerpunkte des Solar Radiation Management	43
4.1	Gesellschaftliche Wahrnehmung.....	43
4.1.1	Wissensstand	43
4.1.2	Öffentliche Meinungstendenz zu SRM	44
4.1.3	Ansätze zur Einflussnahme der öffentlichen Wahrnehmung	45
4.2	Ethische Betrachtungsweise	46
4.2.1	Natur-, Religions- und existentialistische Ethik.....	46
4.2.2	Zukunftsethik (Transfer von Missständen und Risiken)	47
4.2.3	Gerechtigkeit und Fairness	48
4.3	Rechtlicher Rahmen & Politische Instrumente.....	48
4.3.1	Relevante Regelwerke.....	49
4.3.1.1	Wiener Konvention & Montrealer Protokoll.....	49
4.3.1.2	CLRTAP	50
4.3.1.3	Internationales Klimaschutzrecht	50
4.3.1.4	ENMOD	51
4.3.1.5	Weltraumvertrag von 1967.....	51
4.3.1.6	Convention on Biological Diversity (CBD)	51
4.3.2	Governance	52
4.3.2.1	Rechtliche Lage.....	52
4.3.2.2	Ansatz für eine mögliche Governance	53
4.3.2.3	Herausforderungen der Governance.....	54
4.4	Ökonomische Faktoren	55
4.4.1	Kostenschätzung	55
4.4.2	Methodenproblematik und Diskrepanzen in der Literatur	56
4.4.3	Trends und Beachtenswertes	57
5	Kontroverse	58
5.1	Messungen	59
5.1.1	Regenwasser- und Sedimentanalysen.....	59
5.1.2	Luft- und Flugzeugabgasuntersuchungen.....	61
5.2	Stellungnahmen zur Anwendung von SAI	63
5.2.1	Institute und Behörden.....	63
5.2.2	Stimmen & Organisationen gegen CE/SAI	64
6	Diskussion	67
6.1	Forschung & Technologie	67
6.2	Chemikalien und Auswirkungen	68

6.3	Wahrnehmung in Gesellschaft, Wissenschaft und Politik	69
6.4	Das Wetter als Waffe	70
7	Schlussfolgerung	71
8	Literaturverzeichnis	73

Anlagen

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Strahlungsfluss durch die Atmosphäre.....	5
Abbildung 2: Mögliche Kippelemente.....	7
Abbildung 3: Gesamtheit der zum SRM diskutierten Maßnahmen.....	10
Abbildung 4: Stratosphärische Aerosolinjektionen (SAI) mittels Flugzeug.....	13
Abbildung 5: Netzwerk SRM-Forschung finanziell unterstützender Akteure (2008 – 2013). .	20
Abbildung 6: Einschätzung aller diskutierten CE Maßnahmen.....	24
Abbildung 7: Wirkweise photophoretischer Kräfte auf ein Aerosolpartikel aus Aluminiumoxid und Bariumtitanat.....	28
Abbildung 8: Veränderung der Ozonsäule im mehrjährigen Mittel bei Simulationen von je 2, 4 und 8 Megatonnen Sulfataerosolen pro Jahr in Abhängigkeit zum Breitengrad.....	30
Abbildung 9: Auswirkungen von Treibhausgaskonzentration und Solar Radiation Management auf das Ozon.....	32
Abbildung 10: Bodennahe Temperaturen für Simulationsdurchläufe von SAI und dem Abbruch nach 25, 50 und 75 Jahren, startend im Jahre 2000.....	36
Abbildung 11: Entwicklung mittlerer globaler Durchschnittstemperatur bei Abschwächung der Solarkonstante (bei weltraumbasiertem SRM) mit abrupter Beendigung der SRM Maßnahme nach 50 Jahren und weitere Temperaturentwicklung.....	37
Abbildung 12: Zunahme an Publikationen in Form von Print- und Internetmedien, sowie akademischen Beiträgen bzgl. Geoengineering in den Jahren von 2000 bis 2010.....	43
Abbildung 13: Flussschema eines Ansatzes zur Governance.....	54
Abbildung 14: Zwölfmonatige Messuntersuchung von Aluminium-Konzentrationen im Fluss Gomati in Indien.....	60
Abbildung 15: Dünne Wolken am Himmel.....	63
Abbildung B.1.: E-Mail von Frau Siewert vom 09.08.2016.....	91
Abbildung B.2_1.: E-Mail von Frank Fleischer an Karin Kartschall vom 05.08. 2016 (1).....	92
Abbildung B.2_2.: E-Mail von Frank Fleischer an Karin Kartschall vom 05.08. 2016 (2).....	93
Abbildung B.3.: E-Mail von Herrn Poetschke vom 23.08.2016.....	94

1 Einführung

1.1 Hintergrund und Zielsetzung

Um den Anforderungen an die Auswirkungen des Klimawandels gerecht zu werden sind bereits in den letzten Jahrzehnten Maßnahmen zur Minderung der Treibhausgase (Mitigation) und zur Anpassung an die irreversiblen Auswirkungen des Klimawandels (Adaption) getroffen worden.

Mitigation und Adaption stehen im Fokus von Bestrebungen Treibhausgasemissionen kontrollieren zu können. Um einer trotz dieser Bemühungen möglichen Erwärmung und unvorhersehbaren Entwicklung des Klimasystemes der Erde entgegenwirken zu können, werden Möglichkeiten diskutiert, in das Klimageschehen einzugreifen und es somit kontrollierbarer zu machen.

„Jeder redet über das Wetter, aber keiner tut etwas dagegen.“ – Mark Twain

Die Idee, das Klima zu beeinflussen ist wohl so alt wie die Menschheit selbst. Seit den 1940-er Jahren wird über die Möglichkeit diskutiert und geforscht, die durch das Klima entstandenen Schäden zu beheben oder zu minimieren. Dazu gehören beispielsweise Maßnahmen zur Abschwächung von Hurrikans, um volkswirtschaftliche Schäden zu mindern (Heintzenberg, 2011, S. 6).

Die Entwicklung des sich derzeit um bis zu 0,2 °C pro Jahrzehnt erwärmenden Planeten (Pachauri et al., 2015, S. 43) durch Klimamodifikation Einhalt zu gebieten, ist Gegenstand der Diskussion.

Der Begriff, der die Maßnahmen zusammenfasst, die dem Klimawandel in Form von regional und global angewandten Maßnahmen auf technologischer Ebene entgegenwirken können, ist das Geoengineering (GE). Im Zusammenhang mit der in dieser Bachelorthesis betrachteten Analyse wird es vornehmlich als Climate Engineering¹ (CE) bezeichnet.

Geoengineering wird als Maßnahmenkatalog bereits in zahlreichen Studien und Aufsätzen von Klimawissenschaftlern thematisiert und erörtert. Gegenstand der Studien ist vor allem, auf Chancen und Risiken des Geoengineerings hinzuweisen und dies somit einer breiten Masse interessierter Bürger zugänglich zu machen. Die Chancen und Risiken können jedoch aufgrund unzulänglicher Modelle noch nicht ausreichend konkret skizziert werden (Rickels et al., 2011, S. 55 – 56).

Bürgerinitiativen, Aktivistengruppen und Bürger sehen sich zunehmend mit dem Thema Climate Engineering konfrontiert, ohne dass derartige Maßnahmen, allen voran das Solar Radiation Management (SRM) von Wissenschaftlern oder Regierungen offiziell vorgestellt wurde. Das am häufigsten Erwähnung findende und in dieser Bachelorthesis behandelte Solar

¹ Die Bundesregierung bezeichnet großskalige Eingriffe in das Klimasystem als Climate Engineering (Deutscher Bundestag (17. Wahlperiode), 2012, S. 2).

Radiation Management, das durch die Ausbringung von Aerosolen² in die Stratosphäre mittels Flugzeugen angewendet werden würde, trägt die Bezeichnung Stratospheric Aerosol Injection (SAI).

Das fehlende Einbeziehen der Bevölkerung in die Debatte und fehlende Informationen über die Implikationen des Fallouts³ erfordern es, das Thema greifbarer zu machen und es mit all seinen konkreten Chancen und Gefahren bewerten und beurteilen zu können.

Diese Bachelorarbeit setzt daher das Ziel, einen wissenschaftlichen Rahmen zu bieten für die Aufklärung interessierter Bürger, die im künftigen Diskurs über die Ausbringung von Aerosolen im Zuge von SRM Maßnahmen einen realistischen, breit aufgestellten und zugänglichen Horizont erhalten sollen. Dabei ist von Bedeutung, welche Möglichkeiten und Gefahren diese Maßnahmen bergen. Eine verlässliche Datenbasis zu schaffen und sich kritisch mit diesem Thema auseinanderzusetzen, um es bewertbar zu machen, ist das Ziel.

1.2 Vorgehensweise bei der Bearbeitung

„Hinsichtlich welcher Aspekte des SRM besteht Forschungsbedarf?“ und „Findet die Anwendung des SRM bereits statt?“ sind die Forschungsfragen für diese Abschlussarbeit und sollen Aufmerksamkeit auf das Climate Engineering, besonders auf das SAI, lenken.

Aufbauend auf den Erkenntnissen der Forschung und Entwicklung von CE-Ansätzen wird die vorliegende Bachelorarbeit eine Analyse vornehmen, die den Stand der Wissenschaft sowie die Entwicklung und Erprobung des CE hinsichtlich des Solar Radiation Managements (SRM), mögliche Auswirkungen und die Wahrnehmung in Wissenschaft, Politik und Öffentlichkeit erfasst. Hierbei wird insbesondere der Fokus auf SAI gelegt.

Zunächst wird eine Einführung in das **Klimasystem der Erde** gegeben, auf die eine Vorstellung des **Geoengineering / Climate Engineering** folgt und beschrieben wird, welche Umstände dem Aufkommen dieses Begriffes zugrunde liegen. Kurz werden die verschiedenen, in der Literatur diskutierten, Ansätze zum SRM beleuchtet und es wird gezeigt, aus welchen Gründen das CE diskutiert wird. Um die Gesamtheit und die Tragweite des SRM zu erfassen, werden die Maßnahmen grob umrissen, die bereits konzeptionell erwogen wurden. Es werden Einsätze aufgezeigt, die seit dem Zweiten Weltkrieg vorgenommen wurden und geben so einen Einblick in die bereits stattfindenden Erprobungen der Wettermodifikation.

In Kapitel 3 wird konkret und detailliert auf die Beeinflussung der Strahlungsbilanz zum derzeitigen **Stand der Wissenschaft zum Solar Radiation Management** eingegangen. Um einen Einblick darin zu bekommen, welche Akteure und Institutionen beteiligt sind, werden **Forschungsbestrebungen** aufgegriffen, die bereits in mehr oder weniger großem Umfang stattfinden.

² Aerosole sind feste oder flüssige Teilchen mit einer Größe zwischen drei Nanometern und 10 Mikrometern (Lohmann, 2010, S. 24).

³ Fallout meint hier die Fracht, die durch Schwerkraft oder Regen von der Stratosphäre in die Troposphäre und letztendlich auf die Erdoberfläche gelangt.

Bereits vorliegende **Patente** werden vorgestellt, die als Grundlage für eine Durchführung von Feldversuchen oder einem tatsächlichen potenziellen Einsatz der CE-Maßnahme dienlich sein würden. Einige der in den Patenten beschriebenen Verfahren dienen als Schnittstelle, die den Zusammenhang bisheriger und für den Einsatz angedachter Ansätze zur Ausbringung von Aerosolen verbinden und auf die geplanten **technologischen Gegebenheiten von SAI** angewendet werden können. Durch diese Darstellung eröffnet sich der Anwendungsbereich, in dem ein auf die Ausbringung von Aerosolen basiertes CE stattfinden kann. **Verwendete Chemikalien**, deren Ausbringung in die Stratosphäre diskutiert wird, werden vorgestellt und deren Eigenschaften dargestellt. Mit dem Wissen, welche Stoffe Verwendung finden sollen, werden deren **mögliche Auswirkungen / Nebenwirkungen von SAI** auf die Umwelt und den Menschen skizziert.

Abschließend zu Kapitel 3 werden die Chancen und Risiken der CE-Maßnahmen vor technologischem Hintergrund mit **Argumenten zum Für und Wider der Forschung und der Einsatzbereitschaft** analysiert.

Nach der Zusammenstellung der Fakten zum Stand der Wissenschaft werden **Betrachtungsschwerpunkte des SRM** in Kapitel 4 angeführt, die - auf verschiedenen Betrachtungskategorien basierend - die Ausbringung von Aerosolen, zunächst in der **gesellschaftlichen Wahrnehmung** abhandeln.

Der **ethischen Betrachtungsweise** liegen Argumente zugrunde, die die Erforschung und den Einsatz von SRM Technologien auf ihre moralischen Gesichtspunkte hin beleuchtet. Der **rechtliche Rahmen und politische Instrumente**, die einer Erprobung oder Durchführung von SRM Maßnahmen im Wege stehen oder ermöglichen, werden daraufhin dargelegt. Zu letzt werden die **ökonomischen Faktoren** in Betracht gezogen.

Die **Kontroverse** in Kapitel 5, die sich mit Quellen beschäftigt, die auf eine möglicherweise bereits stattfindende Erforschung und vor allem Erprobung dieser Technologie hindeutet, knüpft an bereits genannte Punkte zum Stand der Wissenschaft an und thematisiert Quellen, die z. B. durch Laboranalysen in Zusammenhang mit den vorgeschlagenen Chemikalien (Kapitel 3.4) in Verbindung gebracht oder mit wahrnehmbaren Phänomenen abgeglichen werden können. Vor dem Hintergrund der Erkenntnisse zum Stand der Wissenschaft werden Fakten angeführt, die auf eine derzeitige Anwendung des SAI hindeuten könnten. Hierbei kommen unter anderem Politiker, Initiativen, ein Neurobiologe und eine ehemalige Industriehygienikerin der US Air Force zu Wort.

Die **Diskussion** in Kapitel 6 bringt die vorher beschriebenen Fakten in Zusammenhang und bereitet diese strukturiert für die Schlussfolgerung auf. Die **Schlussfolgerung** stellt mit Kapitel 7 den abschließenden Teil dieser Arbeit dar. Dieser Teil wird die definierten Forschungsfragen auf Grundlage der gesammelten Fakten und der Diskussion versuchen zu beantworten und Unzulänglichkeiten im bisherigen Umgang mit SAI zum Gegenstand haben.

2 Das Klimasystem der Erde und das Geoengineering / Climate Engineering

Für die Betrachtung der CE Maßnahmen, die hier behandelt werden ist es unabdingbar, einen Überblick über die (vereinfachte) Funktionsweise des Klimasystems der Erde zu geben.

Diese Informationen und Begriffe dienen der Kenntnis darüber, welche Prozesse und Mechanismen maßgebend bei der Erwärmung des Klimas teilhaben und wie sie benannt werden. Das Verständnis der im Folgenden dargestellten, simplifizierten Übersicht dieser Mechanismen wird die Begriffe einführen, die im weiteren Verlauf der Thesis verwendet werden. Parallel dazu werden hieraus die Faktoren ersichtlich, die zur Beeinflussung des Klimas dienen könnten und die Idee von CE somit in einen vorstellbaren Horizont rücken lassen.

2.1 Das Klimasystem der Erde

2.1.1 Zirkulation in der Atmosphäre

Die Atmosphäre hat die Eigenschaft überwiegend durchlässig für die von der Sonne ausgehende kurzwellige UV-Strahlung zu sein.⁴ Zeitgleich sind die in der Atmosphäre befindlichen Treibhausgase (wie etwa CO₂) dafür verantwortlich, dass die langwellige Infrarot-Strahlung (Wärmestrahlung), die von der Erde ausgeht, von der Schicht an Treibhausgasen absorbiert wird (Rickels et al., 2011, S. 37 – 38) (s. Abbildung 1).

Diese natürliche Absorptionsfähigkeit der Atmosphäre sorgt dafür, dass genügend Wärme zwischen Boden und Atmosphäre gespeichert bleibt und somit ein Milieu besteht, das Leben auf der Erde ermöglicht. Ohne die schützende Wirkung der Atmosphäre wäre eine Bodentemperatur von – 18 °C (Rickels, 2011, S. 38) die Regel, was die Entwicklung von Leben auf diesem Planeten unmöglich gemacht hätte.

⁴ Etwa 30 Prozent der kurzwelligen Sonnenstrahlung werden von der Atmosphäre zurück ins Weltall gestrahlt.

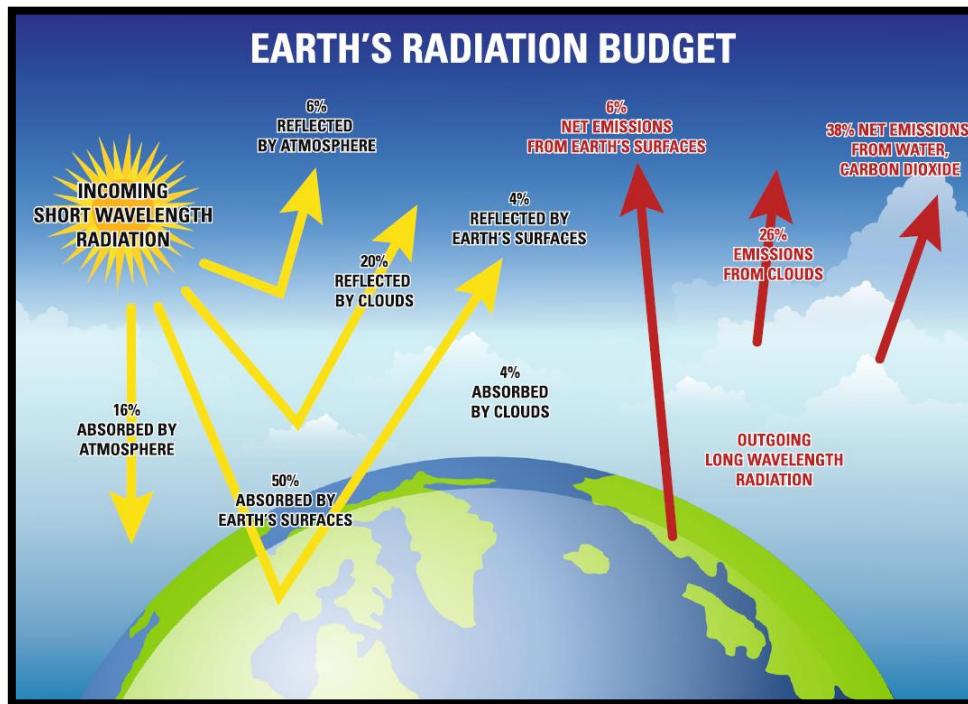


Abbildung 1: Strahlungsfluss durch die Atmosphäre. 235 W/m^2 - etwa 70 % der auf die Atmosphäre auftreffenden Strahlung von 342 W/m^2 , da 30 % ins Weltall zurückgestrahlt werden - erwärmen im Gleichgewichtszustand die Erde und werden sowohl durch die Atmosphäre geleitet und absorbiert als auch ins All emittiert (Rickels et al., 2011, S. 37; Roedel & Wagner, 2011, S.56). (Quelle: Effiong & Neitzel, 2016, S. 2).

Ist eine zu hohe Konzentration an Treibhausgasen vorhanden, steigt die Temperatur des Planeten infolge von ‚gefangener‘ Wärmestrahlung: Der *Strahlungsantrieb* steigt. Der Strahlungsantrieb (angegeben in W/m^2) ist ein Maß für die Energiebilanz der Erde und je mehr vorhanden ist, desto stärker wird die globale Erwärmung. Der Strahlungsantrieb kann durch die Aktivität der Sonne, Aerosole, Treibhausgase, die Albedo⁵ – kurzum, durch alle klimarelevanten Faktoren beeinflusst, also verstärkt oder vermindert, werden.

Die kurzwellige Strahlung, die in Form solarer Strahlung mit 342 W/m^2 (Rickels et al., 2011, S. 37) auf die Atmosphäre trifft, wird durch Wolken und Erdoberfläche (planetare *Albedo*) reflektiert, hierdurch um 30 % gemindert (Heintzenberg, 2011, S. 7) und dringt somit etwa mit einer Stärke von 235 W/m^2 durch die Atmosphäre. Derzeit ist ein Strahlungsantrieb zwischen $+1,1$ und $+3,3 \text{ W/m}^2$ im Klimasystem vorhanden (Pachauri et al., 2015, S. 44).

⁵ Die Albedo ist das relative Reflexionsvermögen einer Fläche und wird in Verhältnis zur eintreffenden (reflektierten) Strahlung gesetzt (Roedel & Wagner, 2011, S. 23). Die Albedo kann folglich in Prozent angegeben werden.

2.1.2 Klimasensitivität

Ergänzend zur in Kapitel 2.1.1 vereinfachten Darstellung wird eine Komponente ergänzt, die als Klimasensitivität⁶ bezeichnet wird. Die Klimasensitivität ist ein Maß dafür, wie sich die weltweit gemittelte bodennahe Durchschnittstemperatur auf eine Änderung im Strahlungsantrieb auswirkt (Roedel & Wagner, 2011, S. 538 - 539).

Der Strahlungsantrieb ist ein Maß für die Energiebilanz der Erde und folglich Ausdruck der Zu- oder Abnahme eines klimarelevanten Parameters, wie beispielsweise der CO₂-Konzentration.⁷

Das Erreichen der mittels der Klimasensitivität angegebenen Temperaturspanne würde die Einstellung eines Gleichgewichtszustandes hinsichtlich eines veränderten Strahlungsantriebes bedeuten.

Derzeit wird die Klimasensitivität zwischen 1,5 °C und 4,5 °C für die bodennahe Durchschnittstemperatur im Falle einer Verdopplung der CO₂-Konzentration⁸ beziffert (Pachauri et al., 2015, S. 62; Roedel & Wagner, 2011, S. 557). Die Klimasensitivität kann demnach als Maß für Auswirkungen verstanden werden, die das Klima verändern.

Das Klimasystem reagiert auf die Änderungen des Strahlungsantriebes mit der Anpassung durch Einstellung eines Gleichgewichtes in unterschiedlichen Zeitskalen. Erreicht das Tiefenwasser des Ozeans erst nach Jahrzehnten oder sogar Jahrhunderten, vor allem über den Austausch mit der Atmosphäre, einen Gleichgewichtszustand der Temperatur, kann sich für die Oberflächentemperatur der Erde binnen weniger Jahre ein neuer Gleichgewichtszustand einstellen (Roedel & Wagner, 2011, S. 539; Rickels et al., 2011, S. 40). Dabei ist zu beachten, dass diesen Anpassungsprozessen eine große Komplexität innewohnt. So ist beispielsweise die Temperaturerhöhung infolge erhöhter CO₂-Konzentrationen an eine erhöhte Bildung von Wasserdampf gekoppelt, was selbst wiederum eine neuerliche Temperaturerhöhung zur Folge hat.

Diese Rückkopplungsmuster sind zwar von der Forschung in ihrer Qualität verstanden worden, große Unsicherheiten über ihre Auswirkungen bestehen jedoch noch immer (Rickels et al., 2011, S. 10; Roedel & Wagner, 2011, S. 539).

2.1.3 Kipppunkte

Die komplexen Wirkweisen des Klimas sind, wie in Kapitel 2.1.2 beschrieben worden, nicht insoweit verstanden worden, als dass sie eine sichere Aussage darüber zulassen würden, wie sich bestimmte Veränderungen des Klimas voraussagen lassen.

⁶ Gemeint ist die *equilibrium climate sensitivity* gem. IPCC (2013, S. 1451).

⁷ Die Zu- oder Abnahme eines klimarelevanten Parameters wird stets zum allgemeinen Verständnis für die Angabe des Strahlungsantriebes in die Einheit W/m^2 umgerechnet.

⁸ Die derzeitige [Stand: 2011, Anm. des Verf.] Konzentration an CO₂ in der Atmosphäre wird auf 430 ppm geschätzt (Pachauri et al., 2015, S. 20). Roedel & Wagner (2011, S. 16) gehen von 385 ppm aus.

Als besondere Veränderungen des Klimas sind sogenannte Kippunkte hervorzuheben. Kippunkte sind die Punkte in der Klimabetrachtung, an denen es ‚kein Zurück mehr‘ gibt. Kippunkte markieren das Ende eines Entwicklungspfades eines Kippelementes⁹ (s. Abbildung 2) in der Klimabetrachtung, dem sodann ein neuer Entwicklungspfad folgt, der nicht abzusehen ist und eine Eigendynamik entwickelt (Rickels et al., 2011, S. 11).

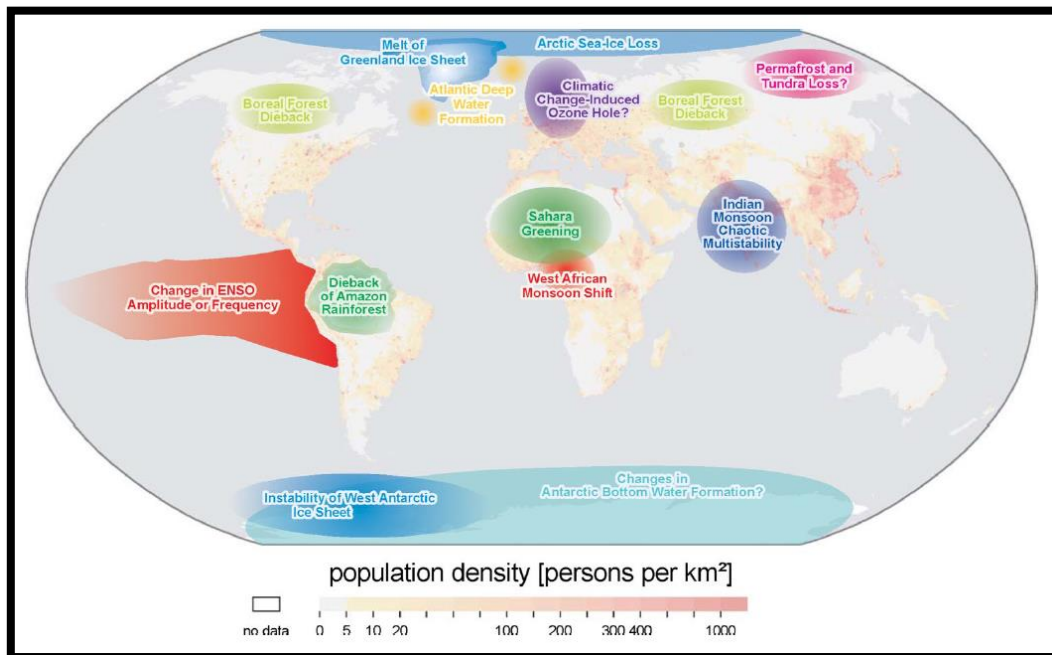


Abbildung 2: Mögliche Kippelemente. Diese Elemente würden nach dem Erreichen eines Schwellenwertes eine unvorhersehbare Entwicklung auf das Klimasystem nach sich ziehen. (Quelle: Lenton et al., 2008, S. 1787).

Wegen der nicht-linearen, unvorhersehbaren Folgen von Rückkopplungseffekten sind Konsequenzen von Klimamechanismen der Kippunkte nicht zu definieren, geschweige denn vorauszusagen. Für ein Erreichen solcher Kippunkte gibt es derzeit keine Anzeichen, mitunter auch, weil verfügbare Klimamodelle jene Schwellenwerte nicht zu erfassen vermögen. (Fischedick et al., 2015, S. 30; Rickels et al., 2011, S. 41)

Lenton et al. (2008) ordnen möglichen Kippelementen kritische Werte zu, an denen eine Erreichung der Schwellenwerte (Kippunkte) einen neuen Entwicklungspfad im Klimasystem der Erde nach sich zöge. Exemplarisch kann für eine Überschreitung des Kippunktes am Grönländischen Eisschild (s. Abbildung 2) eine Zunahme der globalen Durchschnittstemperatur mit 3 °C (gegenüber vorindustriellem Niveau) als kritisch beziffert werden und würde zu

⁹ Kippelemente sind Teile der Erde, denen bei Erreichen eines Kippunktes (oder auch: Schwellenwertes) ein neuer Entwicklungspfad folgt. Häufig benannte Kippelemente sind das Schmelzen des grönländischen Eisschildes, der Zusammenbruch der atlantischen Ozean-Zirkulation oder das Entweichen von Treibhausgasen aus tauenden Permafrostböden. (Rickels et al., 2011, S. 41)

einer weiteren Erhöhung von 1 bis 2 °C und einem Anstieg des Meeresspiegels um 2 bis 7 Meter führen (Lenton et al., 2008, S. 1788).

2.2 Geoengineering / Climate Engineering

2.2.1 **Begriffsdefinition**

Der im Titel der vorliegenden Arbeit enthaltene Begriff des Geoengineerings (GE) dient als Sammelbegriff aller vom Menschen vorgenommenen Maßnahmen, die einen Eingriff oder eine Modifikation der natürlichen Umwelt umfasst (Rickels et al., 2011, S. 9).

Der Begriff umfasst also auch den Eingriff in Flussläufe, wie beispielsweise bei einer Flussbegradigung oder einer Renaturierungsmaßnahme. Um diese Art des GE soll es allerdings nicht gehen.

Vielmehr prägte Cesare Marchetti anfang der 1970er Jahre den Begriff *Geoengineering*, als er untersuchte, ob man Kohlenstoffdioxid (CO₂) in Kohlenstoffsinken im Ozean disponieren könne. Der Eingriff in den Kohlenstoffkreislauf begriff er als „Geoengineering“ (Keith, 1998, S. 3), was dem Zweck der Maßnahmen, um die es in dieser Thesis gehen soll, schon mehr Rechnung trägt. Im Rahmen dieser Bachelorarbeit wird allerdings nicht das CO₂-basierte GE behandelt. Zu beachten ist, dass mit Marchettis Vorgehen GE nicht als Maßnahmenkatalog begriffen wird, weil nach seiner Definition nur die Bindung von CO₂ beabsichtigt wurde.

Um also weiter zu spezifizieren und verständlich zu machen, dass es sich in den betrachteten Ansätzen um großskalige Eingriffe in das Klimasystem handeln soll, ist hier der Begriff *Climate Engineering* (CE) zielführender (Deutscher Bundestag (17. Wahlperiode), 2012, S. 2; Rickels et al., 2011, S. 9).

Es wird die Begriffsdefinition vereinbart, dass CE eine Maßnahme zum Eingriff ins Klimasystem des Planeten darstellt, das zeitlich nach dem Ausstoß von Treibhausgasen aber vor der Adaption an die Konsequenzen des Klimawandels ansetzt (Rickels et al., 2011, S. 9).

2.2.2 **Erfordernis zur Erwägung von CE durch verschiedene Akteure**

Bereits 1965 wurde dem US-Präsidenten der Bericht „Restoring the Quality of our Environment“ vom Science Advisory Committee vorgelegt, in der GE als einzige Lösung zum CO₂-bedingten Klimawandel herausgedeutet wird. Die Reduktion von Emissionen finde dort hingegen keine Erwähnung. (Keith, 2002, S. 355)

Die *National Academy of Sciences* (1991, S. 128) deutete in den frühen 1990er Jahren bereits das Potenzial heraus, dass GE Maßnahmen benötigt werden könnten, wenn eine hohe Klimasensitivität infolge veränderten Strahlungsantriebes eintreten würde.

Das CE wird in den letzten Jahren erwogen, um einer möglichen Verdopplung der CO₂-Konzentration entgegenwirken zu können. Dafür wäre eine Minderung solarer Strahlung um 1,8 % vonnöten¹⁰ (Robock, 2008, S. 3; Royal Society, 2009, S. 23).

Seit 1870 bis zum Jahre 2011 sind 1900 Gt¹¹ anthropogenes CO₂ emittiert worden, wohingegen mit einer 66%-igen Wahrscheinlichkeit insgesamt nur 2900 Gt CO₂ emittiert werden dürfen, um unterhalb einer Erwärmung von 2°C¹² gegenüber dem Niveau von 1861 bis 1880 zu liegen (Pachauri et al., 2015, S. 10). Darüber hinaus wird bei einem Scheitern des 2°C-Zieles das Erreichen von Kippunkten befürchtet (Fischedick et al., 2015, S. 30).

CE findet im aktuellen Synthesis Report des IPCC Erwähnung. Aus Sicht des IPCC ist die Einhaltung des 2-°C-Zieles ohne eine Limitierung auf nahezu null Emissionen und ohne die Verwendung von Schlüsseltechnologien nicht zu erreichen (Pachauri et al., 2015, S. 20).

Vor diesem Hintergrund, aber auch schon mit einer Veröffentlichung von Paul Crutzen im Jahre 2006 (Rickels et al., 2011, S. 14) wird insbesondere die Methode diskutiert, mit der Beeinflussung des Strahlungshaushaltes zu einer zügigen Abkühlung des Planeten beitragen zu können. Ein konkretes Erfordernis liegt deshalb jedoch trotzdem nicht ausdrücklich vor.

Es ist zu beachten, dass es auch immer wieder Überlegungen dazu gab, die Beeinflussung des Klimas zu thematisieren. So ist der amerikanischen Luftwaffe (United States Air Force) von Tamzy et al. (1996) des Department of Defense der Vereinigten Staaten eine Forschungsarbeit vorgelegt worden, die die Motivation verdeutlicht bis 2025 in einem wissenschaftlichen Stadium angekommen zu sein, welches es erlauben würde, das Wetter als Waffe gegen potenzielle Gegner verwenden zu können. In diesem Dokument ist die Rede davon, eine auf Klimamodifikation basierende Technologie zur Abschreckung von möglichen Feinden durch die Schaffung von Fluten, Dürren oder der Verstärkung von Stürmen, anwenden zu können (vgl. Tamzy et al., 1996, S. 8).

2.2.3 Vorgeschlagene Maßnahmen des CE zur Beeinflussung des Strahlungshaushaltes

Um einen Überblick darüber zu bekommen, wie sensibel das Klima auf bestimmte Geschehnisse reagieren kann, ist ein Exkurs ins Jahr 1991 dienlich.

In diesem Jahr brach auf den Philippinen der Vulkan Pinatubo aus, der die globale bodennahe Durchschnittstemperatur in den folgenden zwei Jahren um bis zu 0,5 °C sinken ließ (Robock & Mao, 1995, S. 1093; Schmidt et al., 2012, S. 3).

¹⁰ Die Minderung solarer Strahlung um 1 % (-2,35 W/m²) hat eine Minderung der Bodentemperatur um 1,8 °C zur Folge. Mit Minderung der solaren Strahlung um 1,8 % ergo um 4 W/m² (+ 4 W/m² entspricht einer Verdopplung der CO₂-Emissionen gegenüber vorindustriellem Niveau von 275 auf 550 ppm) kann einer Erwärmung um etwa 3 °C entgegengewirkt werden. (Royal Society, 2009, S. 3 – 4, 23)

¹¹ 1 Gigatonne entspricht 1 Mrd. to (1*10¹² kg).

¹² Das „2°C-Ziel“ besteht darin, die globale Erwärmung bis 2100 auf unter 2 °C, gegenüber dem vorindustriellen Niveau, zu halten (Fischedick et al., 2015, S. 30).

20 Megatonnen¹³ Schwefeldioxid wurden im Zuge des Ausbruches in die untere Stratosphäre befördert, wo es durch die dort herrschenden Winde binnen weniger Wochen den gesamten Globus umkreiste und die Albedo beeinflusste (Robock, 2008, S. 15; Robock & Mao, 1995, S. 1086).

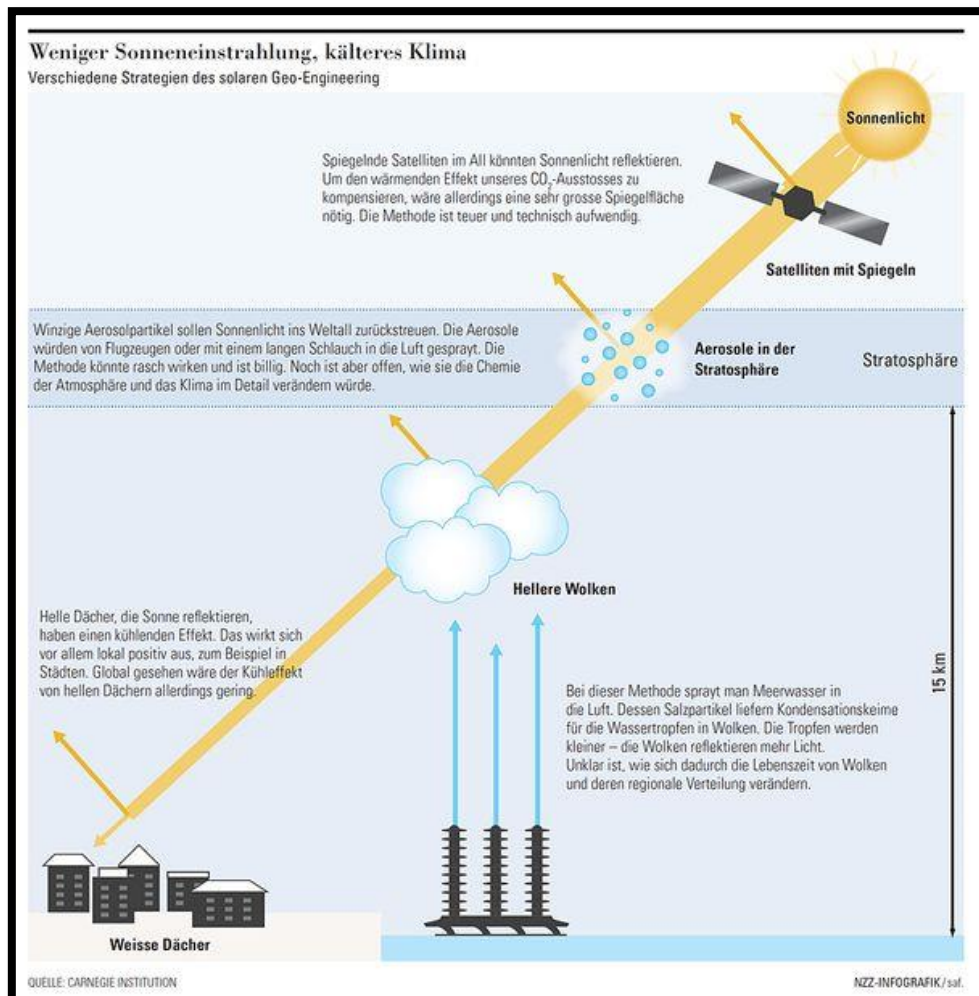


Abbildung 3: Gesamtheit der zum SRM diskutierten Maßnahmen. Oberflächenbasiertes SRM (Weißung von Dächern, genetisch modifizierte Pflanzen und Wüstenreflektoren), troposphärenbasiertes SRM (Aufhellung von Zirkus- oder marinen Wolken), oberer-atmosphärenbasiertes SRM (auch SAI genannt; Ausbringung von Aerosolen in die Stratosphäre), weltraumbasiertes SRM (Weltraumreflektoren). Bild: Carnegie Institution. (Quelle: Gujer, 2012).

Vor dem Hintergrund der in Kapitel 2.1 dargelegten vereinfachten Funktionsweise des Klimasystems der Erde ist also ersichtlich, dass eine klimarelevante Größe, die Albedo, bei dem Vulkanausbruch beeinflusst wurde und somit zu einer Änderung im Klimasystem weltweit führte.

¹³ 1 Megatonne entspricht 1 Mio. to ($1 \cdot 10^9$ kg).

Die Idee davon, Schwefelpartikel bewusst in die Stratosphäre zu injizieren, um einen ähnlichen Effekt zu erzeugen wie der Pinatubo im Jahre 1991, war zum Zeitpunkt des Ausbruches nicht neu und wurde bereits in den 1970er Jahren diskutiert (Robock et al., 2009, S. 1). Die Gesamtheit der diskutierten CE Maßnahmen, von denen in dieser Bachelorarbeit hauptsächlich die Stratospheric Aerosol Injection (SAI) behandelt wird, wird in Abbildung 3 dargestellt. Das SAI wird dem Solar Radiation Management (SRM) zugeordnet. Das Carbon Dioxide Removal (CDR) wird hier nicht thematisiert, da es komplex genug ist, um eine eigene Abschlussarbeit hierüber zu verfassen. Es wird der Vollständigkeit halber an dieser Stelle lediglich kurz erwähnt.

Der Effekt, dass solare Strahlung reflektiert wird, findet sich in allen Technologien zum SRM wieder. Um die Idee des Climate Engineerings und die sich daraus ergebenden Problemfelder zu verstehen, werden die Technologien zunächst vorgestellt. Unterteilt werden die Technologien in:

- Erhöhung der Oberflächenalbedo (Wüstenreflektoren, genetisch modifizierte Pflanzen, Weißstreichung von Dächern)
- Modifikation von Wolken (Modifikation von Zirkus- sowie Marinewolken)
- Ausbringung von Aerosolen in die Stratosphäre / Stratospheric Aerosol Injection (SAI)
- Reflektoren im Weltall (Weltraumspiegel).

2.2.3.1 Erhöhung der Oberflächenalbedo

Eine Idee, den Strahlungshaushalt zu beeinflussen, besteht darin, die Albedo der Erdoberfläche zu erhöhen. Dabei wird vor allem die Landoberfläche in den Wüsten der Erde betrachtet. Die Albedo der Wüstenfläche könnte durch eine Oberfläche aus Polyethylen-Aluminium von 36 % auf 80 % erhöht werden und somit einen Strahlungsantrieb von $-2,75 \text{ W/m}^2$ erreichen (Lohmann, 2010, S. 24).

Ein weiterer Vorschlag bezieht sich auf das Weißstreichen von Dächern in urbanen Gegenden, um Sonnenstrahlung zu reflektieren. Die Maßnahme ist mit einem erreichbaren Strahlungsantrieb von $-0,2 \text{ W/m}^2$ als gering anzusehen (Royal Society, 2009, S. 25).

Weiterhin wird vorgeschlagen, Nutzpflanzen mit einem Blattglanz zu versehen, der die Albedo der Agrarfläche erhöhen kann. Die Temperatur in der nördlichen Hemisphäre könnte dadurch um bis zu $1 \text{ }^\circ\text{C}$ gemindert werden (Singarayaer, 2009, S. 4; Royal Society, 2009, S. 35).

2.2.3.2 Modifikation von Wolken

Bei der Modifikation von Wolken werden sowohl die Modifikation von Zirkuswolken als auch von marinen Schichtwolken diskutiert.

Bei der Modifikation von Zirkuswolken handelt es sich um das Einsäen von Eiskeimen in Wolken, die dafür sorgen, dass Eispartikel in diesen Wolken entstehen, die die Wolke auflösen und somit den Bedeckungsgrad reduzieren (Rickels et al., 2011, S. 46). Dies hat zur

Folge, dass die von der Erde ausgehende Wärmestrahlung aus der Atmosphäre austreten kann – nur 60 % der Wärmestrahlung, die von der Erde ausgeht, verlässt letztendlich auch die Atmosphäre (Royal Society, 2009, S. 2) – und nicht mehr durch Wolken im Klimasystem der Erde gehalten wird. Streng genommen gehört diese Methode zum Thermal Radiation Management (TRM), welches die Beeinflussung der von der Erde ausgehenden Wärmestrahlung meint.

Die Beeinflussung von marinen Schichtwolken besteht darin, Kondensationskeime (Cloud Condensation Nuclei, kurz: CCN) in marinen Wolken einzupflegen. Diese Keime sorgen für eine höhere Konzentration der kondensierenden Tropfen in den Wolken, was eine gleichzeitige Verkleinerung der Tropfen bewirkt. Effektiv wird hierdurch die Albedo der marinen Wolke erhöht und kann einen Strahlungsantrieb von – 2,5 bis zu – 3,9 W/m² erreichen (Rasch et al., 2009, S. 3).

2.2.3.3 Ausbringung von Aerosolen in die Stratosphäre / Stratospheric Aerosol Injection (SAI)

Die bereits mehrfach erwähnten Aerosole bedürfen im Zusammenhang mit der Wirkweise von SAI einer Erläuterung. Aerosole sind feste oder flüssige Partikel, die als Suspension in der Luft vorliegen. Ihre Größe kann im Bereich zwischen 1 nm und 100 µm angegeben werden. (Klose, 2016, S. 232)

Neue Aerosole können auf zwei verschiedene Weisen in die Atmosphäre gelangen: Indem Gase zu Partikeln werden (durch Kondensation oder Nukleation¹⁴) oder durch die Aufwirbelung fester oder flüssiger Partikel (Dispergierung), die bereits kondensiert sind, z. B. Mineralstäube.¹⁵ (Klose, 2016, S. 232; Roedel & Wagner, 2011, S. 464)

Diese neuen Partikel sind verändernden Prozessen unterworfen. Sehr kleine Partikel im Nanometerbereich, die durch Nukleation entstehen, koagulieren¹⁶ mit mittelgroßen Partikeln, wohingegen die, durch Dispergierung entstandenen, Teilchen als Kondensationskeim von Wolken- oder Nebeltropfen fungieren (Klose, 2016, S. 233). Darüber hinaus setzen sich die neuen Aerosole auf Wassertröpfchen ab oder Stoffe setzen sich auf den neuen Aerosolen ab (vgl. Roedel & Wagner, 2011, S. 473).

Der Ansatz, der mit dieser Arbeit ausführlich Beachtung finden wird, ist die Ausbringung von Aerosolen – Stratospheric Aerosol Injection (SAI). Es handelt sich bei dieser Maßnahme um die großflächige Ausbringung von Aerosolen in die Stratosphäre.

¹⁴ Nukleation ist die Kondensation eines flüssigen Aerosolpartikels aus der Gasphase. Für gewöhnlich kommen sehr kleine sekundäre Partikel in der Atmosphäre durch die direkte Nukleation von mineralischen und organischen Partikeln aus Gasen heraus zustande oder durch die Kondensation auf vorhandene Partikel.

¹⁵ Bei Kondensation oder Nukleation von der Umwandlung der Gasphase zu Partikeln werden die Partikel sehr klein (Entstehung in Nanometern). Durch die Dispergierung können die Partikel größer - zwischen 1 und 10 µm groß - werden. (Klose, 2016, S. 232 – 233)

¹⁶ Die Koagulation ist das Ausfällen (Ausflocken) kolloidaler Stoffe aus ihrer Lösung durch chem., physikal. oder therm. Einflüsse (Der Brockhaus, 2002, Band 7, Artikel Koagulation).

Als Stoff werden hauptsächlich Schwefelverbindungen (Planungsamt der Bundeswehr, 2012, S. 18) und Aluminium (Umweltbundesamt, 2011a, S. 14; Benduhn & Lawrence, 2013, S. 7915) diskutiert. Kurzwellige Sonnenstrahlung soll so durch die reflektierenden Partikel ins All zurückgestrahlt werden. Die Aerosole in die Stratosphäre zu injizieren kann durch Flugzeuge (s. Abbildung 4) oder durch einen Ballon geschehen.

Der Ansatz zur Ausbringung von Aerosolen wird in Kapitel 3 ausführlich beleuchtet.

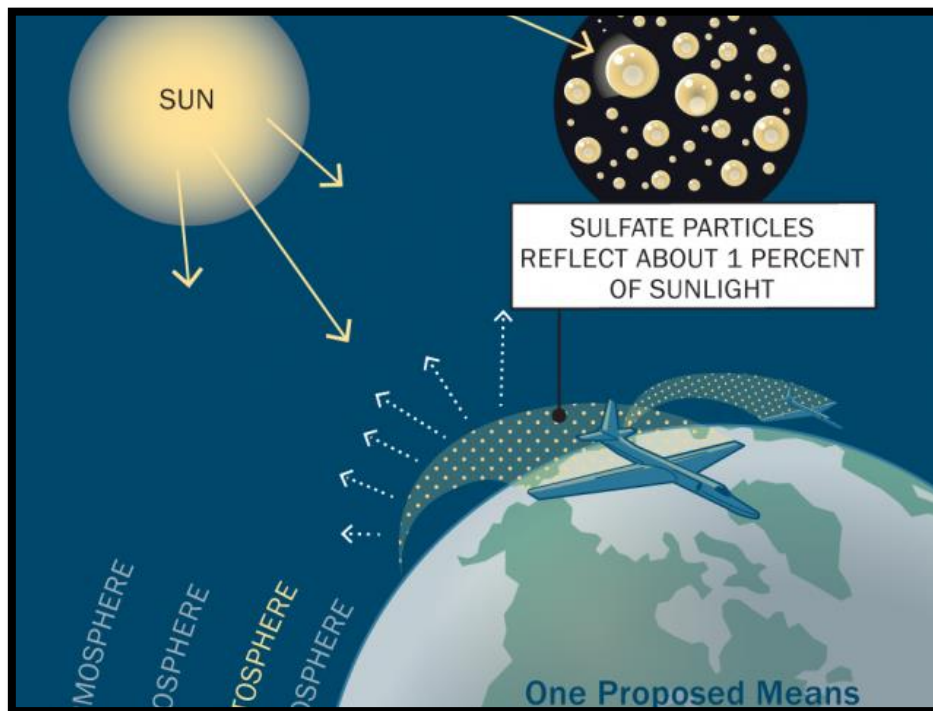


Abbildung 4: Stratosphärische Aerosolinjektionen (SAI) mittels Flugzeug. Bild: Funnel, INC.
(Quelle: www.harvardmagazine.com).

2.2.3.4 Reflektoren im Weltall

Als Variante, schnell einer globalen Erwärmung entgegenzuwirken, könnten Spiegelobjekte ins All befördert werden. Dort sorgen sie für die Reflektion der Sonnenstrahlung, die andernfalls die Erde erreichen würde. 55.000 Spiegel mit einer Größe von je 100 km², Billionen von Miniatur-Sonnenschirmen mit einem Durchmesser von 60 cm oder z. B. eine auf dem Mond hergestellte Linse aus hundert Millionen Tonnen dort vorkommenden Materials liegen als Vorschläge vor (Royal Society, 2009, S. 32).

2.2.4 Bestrebungen und Einsätze von CE seit dem Zweiten Weltkrieg

Entwürfe und Vorschläge bezüglich Forschungsbestrebungen, Regulierungen, Operationen und Studien zur Modifikation des Wetters wurden schon seit 1947 dem amerikanischen Kongress vorgelegt (United States Congress (95th) – Committee on Commerce, Science and Transportation, 1978, S. 193).

Die im Jahre 1964 ins Leben gerufene *Special Commission on Weather Modification* riet der damaligen Regierung zur Befähigung dazu, fremde Wettermodifikationsmaßnahmen hinauszögern oder unterbrechen zu lassen, um nicht mit gleichartigen Bemühungen der amerikanischen Regierung zu kollidieren (United States Congress (95th) – Committee on Commerce, Science and Transportation, 1978, S. 316).

Zum Verständnis dafür, dass CE schon seit Jahrzehnten als Teil von militärischen Operationen sowie als volkswirtschaftliche Maßnahmen (Heintzenberg, 2011, S. 6) genutzt wird, dienen die folgenden beiden Beispiele aus der Vergangenheit.

Die amerikanischen Streitkräfte erhofften sich im Vietnamkrieg einen strategischen Vorteil durch das Impfen von Wolken, um den Ho-Chi-Minh Pass mit Regen zu fluten und somit unbegebar zu machen. Dies geschah zwischen 1967 und 1972. Diese Militäroperation hat unter dem Namen *Operation Popeye* stattgefunden (Tamzy et al., 1996, S. 28).

Project Stormfury wurde in den 1960er Jahren begonnen und hatte die Abschwächung tropischer Hurrikans zum Ziel (Umweltbundesamt, 2011a, S. 3). Silberiodid wurde über zwei Dekaden in Hurrikans eingesät, um ihre Richtung zu ändern (Royal Society, 2009, S. 4).

Das Projekt dauerte von 1962 bis 1983. Es konnte wegen der Einwände von Japan und der Volksrepublik China, die befürchteten, von dem Experiment erfasst zu werden, nur eingeschränkt durchgeführt werden. Geplant war, nachdem Fragen der Haftung geklärt wurden, mit den Experimenten fortzufahren. (United States Congress (95th) - Committee on Commerce, Science and Transportation, 1978, S. 428)

Im Jahre 1976 wurde das Gesetz 94-490 erlassen, das als *National Weather Modification Policy Act of 1976* bekannt ist. Der Zweck des Gesetzes soll u.a. sein, die amerikanischen Forschungsbestrebungen zur Wettermodifikation zu koordinieren und voranzutreiben (United States Congress (94th), 1976, S. 1).

Erwähnenswert sind zudem noch – ohne Bezug auf Klimamodifikation – die flächendeckenden Aerosolimpfungen zu nennen, die bereits in Südamerika und Russland durch die Versprühung von Lebendimpfstoffen vor der Influenza schützen sollten (Roth et al., 2003). Auch in Amerika wurde im Jahre 1950 die Stadt San Francisco mit Keimen besprüht, mit dem Zweck, biologische Kriegsführung zu simulieren (Loria, 2015).

Zwar ebenfalls ohne direkten Zusammenhang mit Wettermodifikation, aber dennoch eingeordnet in die Ausbringung von Stoffen in großer Höhe, ist zu erwähnen, dass in Deutschland zwischen 1998 und 2008 vier mal Düppel¹⁷ (engl.: chaff) zu Untersuchungszwecken von der

¹⁷ Düppel sind aluminiumbeschichtete Glasfasern und dienen dem Zweck der Radarstörung bei Militärübungen.

Bundeswehr ausgebracht wurde. Über den Niederlanden ausgebrachter Düppel¹⁸ hatte im Jahre 2009 ein 300 Kilometer langes und 50 Kilometer breites Wolkenband entstehen lassen (Deutscher Bundestag (16. Wahlperiode), 2009, S. 1).

¹⁸ Der Deutsche Bundestag (16. Wahlperiode) (2009, S. 3) beschreibt, dass „[...] vermutlich Düppel von einem Luftfahrzeug in einer Höhe von ca. 7.000 Meter über Normal Null über niederländischem Hoheitsgebiet [...]“ ausgebracht wurde.

3 Stand der Wissenschaft des Solar Radiation Management

Den derzeitigen Stand der Wissenschaft des SRM zu erfassen ist aufgrund vielerlei Faktoren problematisch. Die Zugkraft der Forschungsanstrengungen und die Anzahl forschender Institute unterscheidet sich erheblich in ihrer Reichweite und ihrer Finanzierung.

Ein gutes Beispiel für die Unstimmigkeit zu einem Thema, das der Öffentlichkeit noch nicht vorgestellt und somit nicht mit eindeutigen Aussagen zu Wirkungen und Risiken gestützt werden kann ist, dass in der Literatur immer wieder Sulfatpartikel erwähnt werden, die als Basis für die Aerosole dienen sollen (Umweltbundesamt, 2016a, S. 1). Diese werden vom renommierten Klimaingenieur David Keith bereits im Jahre 2010 wegen ihrer Eigenschaft, in der unteren Stratosphäre das Ozon abzubauen, gedanklich durch Aluminiumoxid ersetzt, da es nicht in einem so hohen Maße mit Ozon reagiert. Zudem hat Aluminiumoxid eine größere Kapazität, den Strahlungsantrieb zu minimieren, der sich durch eine Verdopplung der CO₂-Konzentration in der Atmosphäre ergeben würde. (Keith, 2010, S. 16428)

Derartige Diskrepanzen deuten auf einen international unabgestimmten Forschungsprozess hin. In diesem Zusammenhang können die im Folgenden zusammengetragenen Fakten aufgrund verschiedener Kenntnisstände in einer logisch nicht nachvollziehbaren zeitlichen Abfolge erscheinen. Der derzeitige Stand der Wissenschaft und Technologie kann somit nicht nur aus technologischer Sicht abgebildet werden, sondern beinhaltet noch weitere Fragestellungen, die sich mit den Bedingungen zur Forschung bezüglich Kontrolle und Investitionen in die Forschung zum einen, aber auch um die Machbarkeit von Modellierungen zum anderen beschäftigen müssen.

Um einen neutralen und vielschichtigen Blick auf den derzeitigen Stand von SRM zu bekommen, werden in den folgenden Unterkapiteln derzeitige Bestrebungen zur Forschung sowie Stakeholder¹⁹, die an einer derartigen Technologie mitwirken oder Interesse haben könnten, beleuchtet. Patente, die technologischen Randbedingungen und vorgeschlagene Chemikalien werden vorgestellt, bevor die Auswirkungen der Maßnahmen und das Für und Wider der Erforschung von SRM und einer Anwendung davon dargelegt werden.

3.1 Forschung

Die Frage, ob und wie CE Methoden, insbesondere SRM, weiter erforscht werden sollen, ist bislang weitgehend ungeklärt. In vielen Studien und Publikationen ist davon die Rede, dass die Forschung zum CE noch am Anfang stehe (Rickels et al., 2011, S. 19; Robock et al., 2009, S. 7; Planungsamt der Bundeswehr, 2012, S. 20; Umweltbundesamt, 2011a, S. 17). Es stehen zum Beispiel, um die Auswirkungen von Aerosolen in der Stratosphäre zu simulieren, noch keine ausgereiften Modelle zur Verfügung, die sichere Aussagen erlauben (Dykema et al., 2014, S. 2).

¹⁹ Stakeholder sind an der Debatte über SRM teilnehmende Gruppen wie Bürgerinitiativen, Nicht-Regierungs-Organisationen, Investoren, wissenschaftliche Vereinigungen etc.

Die stattfindende Forschung, die hinsichtlich des SRM bereits Erwähnung findet, verlaufe lediglich theoretisch und noch keine anwendungsbezogenen Befunde konnten erbracht werden (Umweltbundesamt, 2011a, S. 17).

Die Inkohärenz der Aussage, die Forschung stehe noch an den Anfängen, kann im Zusammenhang mit bereits erbrachten Forschungsergebnissen herausgedeutet werden. Diese Inkohärenz ist zum einen dem Zeitraum geschuldet, der zwischen dieser Analyse zum Stand der Wissenschaft und den Studien und Publikationen liegt, die in diesem Kapitel abgehandelt werden. Zum anderen ist festzuhalten, dass Studien, die vor etwa fünf Jahren veröffentlicht wurden, selbst schon ein hohes Maß an Forschungsbestrebung erkennen lassen. Diese Unstimmigkeiten sind in die Bewertung der Forschungsbestrebungen einzubeziehen.

Anknüpfend an die Bestrebungen, Forschung zu organisieren (Kapitel 3.1.1) werden bisher bereits durchgeführte Forschungsprojekte benannt (Kapitel 3.1.2).

3.1.1 Forschungsbestrebungen

In der Literatur tauchen vermehrt folgende drei Schwerpunkte – bezogen auf gegenwärtige als auch zukünftige Forschung zum SRM – auf:

- Regulierung und Koordinierung der Forschung
- Transparenz der Forschung
- Teilnehmer und Finanzierung der Forschung

3.1.1.1 Regulierung und Koordinierung der Forschung

Das Umweltbundesamt (2011a, S. 44) sieht schon die Zulassung der Forschung in Abhängigkeit von den zu erwartenden Risiken für Mensch und Umwelt und fordert diesbezüglich eine Begleitforschung, die die Risiken abschätzen kann. Dies solle durch staatliche Kontrolle geschehen.

Konkrete Kriterien, an denen man sich bei den Erwägungen orientieren müsse, seien ein hoher Grad an Zuverlässigkeit, Vorhersehbarkeit und das Ausbleiben von Nebeneffekten (Jamieson, 1996, S. 326).

Um die Anforderungen an die Forschung einzuhalten, aber auch um die Technologie einsetzen zu können, sollten es die Umstände erfordern, wird hinsichtlich der Koordinierung der Forschungen ein internationaler Rahmen vorgeschlagen (Royal Society, 2009, S. XIV; Osterhage, 2016, S. 9).

Dies war auch eines der Ergebnisse der *Asilomar International Conference on Climate Intervention Technologies*, die im Jahre 2010 in Kalifornien, USA stattgefunden hat, bei der Richtlinien zur Erforschung von CE Technologien erörtert wurden. Im Abschlussbericht dieser Konferenz ist die Rede davon, dass Modellierungen und Laboruntersuchungen bereits im Rahmen wissenschaftlicher Untersuchungen stattfinden können. (Asilomar Conference,

2010, S. 25). Von der Durchführung von Feldversuchen wird hingegen keine konkrete Aussage getroffen.

Um Meinungen und Austausch über die Regierbarkeit (Governance) von SRM-Forschung zu fördern, wurde die Solar Radiation Management Governance Initiative (SRMGI) auf Geheiß des Reportes der Royal Society *Geoengineering the climate* gegründet. SRMGI hat unter anderem den Zweck, Entwicklungsländer in die Diskussion über die Governance von SRM-Forschung einzubeziehen. Eine derzeitige Institution, die die Herausforderungen, die Forschungen zu regulieren, bewältigen könnte, existiert noch nicht (SRMGI, 2012, S. 56; Robock, 2015, S. 4).

Dem entgegen steht die ETC Group²⁰, die kritisiert, dass bereits über das „Wie“ der Forschung diskutiert wird, anstatt das „Ob“ zuerst zu debattieren (ETC Group, 2010b, S. 35). Außerdem wird in einem offenen Brief an den *Climate Response Fund* bezüglich seiner Finanzierung der Asilomar Conference bemängelt, dass das Finden von Richtlinien zur Forschung – was Gegenstand dieser Konferenz war – noch kein Gegenstand einer CE Debatte sein könne, solange die Nationen CE wirtschaftlich, sozial, rechtlich, ökologisch und technisch nicht akzeptiert haben. Des Weiteren fordert sie, dass Richtlinien für eine legitime Forschung nicht ohne die Einbeziehung der Vereinten Nationen von statten gehen könne (ETC Group, 2010a).

Bereits erarbeitete und konkrete Vorschläge zur Regulierung und Koordinierung, die in Form einer Governance, die Erforschung von SRM ermöglichen könnte, werden in Kapitel 0 vorgestellt.

3.1.1.2 Transparenz der Forschung

Die Oxford University (2016) formuliert in ihren Prinzipien zum Geoengineering, dass die Forschung transparent verlaufen und deren Ergebnisse öffentlich zugänglich sein sollen. Zusätzlich wird vorgeschlagen, Erkenntnisse der Forschungen von unabhängigen Organen koordinieren und kontrollieren zu lassen, nicht jedoch von den Institutionen selbst, die die Forschung betreiben.

Auch die Royal Society schlägt vor, die Forschungsaktivitäten so offen wie möglich zu gestalten (Royal Society, 2009, S. XIV).

Fehlende Transparenz bezüglich der Asilomar Conference bemängelt und große Bedenken äußern die ETC Group und Umweltschutzorganisationen in einem offenen Brief an die Vorsitzende des Climate Response Fund Dr. Margaret Leinen (ETC Group, 2010a). Zudem fordert die ETC Group einen stärkeren Einbezug von Akteuren, die von SRM Maßnahmen un-

²⁰ Die ETC Group (Action Group on Erosion, Technology and Concentration) ist eine Organisation, die neue Technologien auf ihre sozioökonomischen und ökologischen Aspekte untersucht. Dabei richtet sich die Organisation an diejenigen Menschen, die am stärksten unter den negativen Auswirkungen neuer Technologien zu leiden hätten.

gleich stärker durch mögliche Nebenwirkungen betroffen wären als diejenigen, die die Probleme verursacht haben, die eine Technologie wie SRM erst erforderlich gemacht haben.

Aus Sicht von Renn et al. (2011, S. 54) geht mit der Forderung nach Offenheit der Forschungsvorhaben einher, die Öffentlichkeit in einen transparenten Prozess miteinzubinden, um Glaubwürdigkeit in die Debatte zu erbringen.

Das Planungsamt der Bundeswehr (2012, S. 4) sieht im öffentlichen Vorhandensein der Forschungsergebnisse hingegen das potenzielle Risiko, dass jenes Wissen von nicht-staatlichen Akteuren missbraucht werden könne.

3.1.1.3 Teilnehmer und Finanzierung der Forschung

Ein weiterer Aspekt bezüglich zukünftiger Forschungen betrifft die Teilnehmer an den Forschungsvorhaben sowie diejenigen Parteien, die diese finanzieren.

Im 1991 erschienenen Bericht „Policy Implications of Greenhouse Warming“ (National Academy of Sciences, 1991, S. 80) ist bereits von den Strahlungshaushalt beeinflussendem GE die Rede, das weiter erforscht und entwickelt werden sollte, um Auswirkungen und Nebeneffekte besser zu verstehen.

Zu den Befürwortern weiterer Forschungsbegehren gehören staatliche Institutionen, wie das britische Parlament, der britische Wetterdienst (Met Office), das deutsche Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), die Europäische Kommission, die World Meteorological Organization (WMO), das amerikanische Government Accountability Office (GAO) und die Royal Society (Rayner et al., 2013, S. 3; Met Office, 2013, S. 2; World Meteorological Organization, 2007, S. 2).

An der Forschung beteiligte Institute sind beispielsweise das Max-Planck-Institut, die Rutgers State University, die Stanford University, die University of Leeds sowie das Met Office und das *US National Centre for Atmospheric Research* (Oldham et al., 2014, S. 7).

Die Finanzierung der Forschungsprojekte findet ebenfalls vermehrt in den angelsächsischen Ländern statt. So sind die *National Science Foundation* (NSF) oder der kanadische *National Science and Engineering Research Council* (NSERC) finanziell unterstützend tätig geworden. (Rickels et al., 2011, S. 16)

Im Jahre 2009 hat die Royal Society von der britischen Regierung gefordert, die Erforschung von CE Technologien mit 10 Mio. Pfund pro Jahr zu unterstützen. Seitdem haben die Projekte IAGP²¹ und SPICE²² mehrere Millionen Pfund an Zuschüssen erhalten (Lunt, 2010).

²¹ Integrated Assessment of Geoengineering Proposals (IAGP) ist ein britisches Forschungsprojekt, das interdisziplinär die Effektivität und mögliche Nebenwirkungen von Geoengineering Maßnahmen untersucht. Das Projekt wurde von 2010 bis 2015 realisiert.

Neben den, wie in Großbritannien, staatlich geförderten Forschungsprojekten gibt es in den USA und in Kanada zudem vor allem Unterstützungen aus privater Initiative, Forschungen im CE voranzutreiben. So sind in den USA der *Fund for innovative Climate and Energy research* (FICER) – der von Bill Gates gestützt wird – als Geldgeber für Forschungsprojekte an der University of Calgary (Oldham et al., 2014, S. 8; FICER, 2015) und der *Climate Response Fund* unterstützend für die Asilomar Conference tätig gewesen, deren Vorsitzende Margaret Leinen bei der Firma Climos beschäftigt war. Climos entwickelt Geoengineering-Methoden zum Entziehen von CO₂ aus der Luft und verkauft diese (Pomrehn, 2010, S. 13). Auch die von der amerikanischen Regierung unabhängige Behörde, die NASA, hat zu Publikationen beigetragen. Abbildung 5 gibt einen Überblick über Akteure, die Forschung von SRM-Maßnahmen in den Jahren 2008 bis 2013 finanziell unterstützt haben.

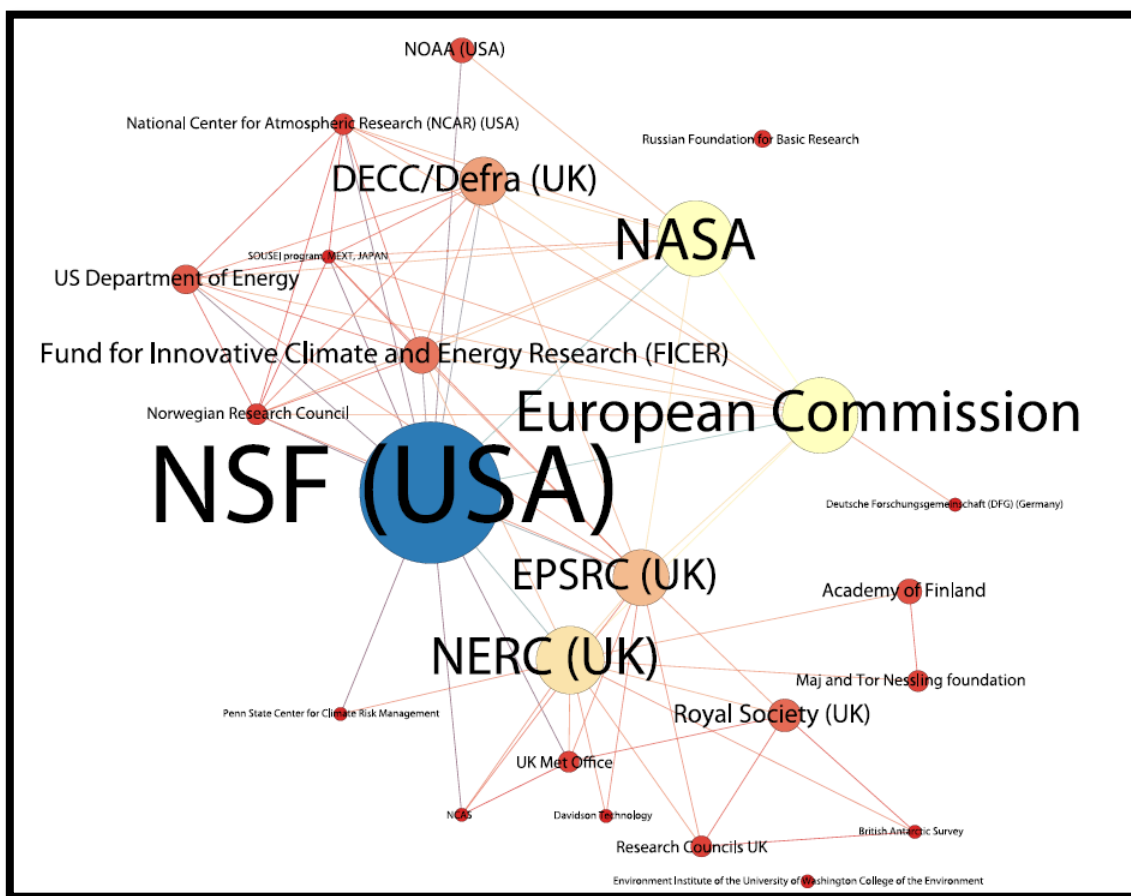


Abbildung 5: Netzwerk²³ SRM-Forschung finanziell unterstützender Akteure (2008 – 2013).
(Quelle: Oldham et al., 2014, S. 9).

²² Stratospheric Particle Injection for Climate Engineering (SPICE) ist ein britisches Forschungsprojekt, das die Machbarkeit von Aerosolinjektionen in die Stratosphäre mit einem, an einem Schlauch an den Boden angebundenen Ballon, untersucht. Das Projekt fand von 2010 bis 2014 statt.

²³ Je größer der Knoten ist, zu desto mehr Publikationen wurde von der entsprechenden Institution beigetragen. Miteinander verbundene Knoten bedeuten eine gemeinsame Nennung bei der Finanzierung einer Publikation. Dabei ist nicht erheblich, ob die genannten Organisationen alle Autoren oder einzelne Autoren unabhängig voneinander finanziell unterstützt haben.

Das mit Patenten handelnde Unternehmen Intellectual Ventures, in welches Microsoft investiert, hat für das SRM eine eigene Forschungsabteilung (Rickels et al., 2011, S. 45). Die mögliche strategische Positionierung durch Firmen, die im Besitz mehrerer Patente zum SRM sind, wird – auch über den Rahmen des CE hinaus – mit der Kommerzialisierung von Technologien assoziiert und geriet dafür in Kritik (Oldham et al., 2014, S. 13).

Erwähnenswert ist zudem das Interesse des amerikanischen Geheimdienstes CIA, das die Studie der Royal Society von 2009 teilweise finanziert hat (Sample, 2015). Robock (2015, S. 4) verdeutlicht, dass die CIA wissen wolle, wie man das Wetter kontrollieren könne, indem er anführt, dass ein Report der National Academy of Sciences erheblich von der CIA finanziert wurde.

3.1.2 Durchgeführte Forschungsprojekte

Nach der Forderung der Royal Society nach einem jährlichen Forschungsetat wurden die Projekte IAGP und SPICE ins Leben gerufen. Das Forschungsprojekt IAGP, das interdisziplinäre Zusammenführung von Expertisen aus den Bereichen Modellierung, Philosophie und Risikowahrnehmung bezweckt, zeigt auf, dass ein frühes Einbeziehen der Bevölkerung und anderer Stakeholder der Umgebung eines verantwortungsbewussten Forschens förderlich sei und den Forschungsprozess demokratisiere. Dies zeige auch die Erfahrung im Umgang mit genmanipulierten Pflanzen und der Nanotechnologie (IAGP, 2014, S. 2). Das Forschungsprojekt soll Erkenntnisse über sowohl eine methodisch nutzbare Einschätzung von Vorschlägen zum Geoengineering als auch über vorbeugende Maßnahmen gegen das Erreichen von Kipppunkten liefern (IPCC, 2012, S. 48).

Bei dem sich bereits mit der Erprobung von SRM auseinandersetzenden SPICE Projekt, das von der britischen Regierung von 2010 bis 2014 gefördert wurde, sollte nach etwa eineinhalb Jahren der theoretischen Forschung ein Versuch unternommen werden, Aerosole mittels eines Ballons in die Stratosphäre zu injizieren. Dieser Versuch konnte aufgrund einer übersehenen Patentanmeldung jedoch nicht durchgeführt werden (Kuo, 2012).

Ein ähnliches Projekt entwickelte die Firma Intellectual Ventures unter dem Namen „StratoShield“. Die Firma gibt an, StratoShield nur bei gegebener Notwendigkeit zu nutzen und nachdem eine international gültige Entscheidung für die Verwendung getroffen wurde (Gibbs, 2009, S. 14).

Ein weiteres Forschungsprojekt, das durchgeführt wurde ist *Implications and risks of engineering solar radiation to limit climate change* (IMPLICC), das von der Europäischen Union zwischen 2007 und 2013 mit 1 Mio. Euro gefördert wurde (Deutscher Bundestag (17. Wahlperiode), 2012, S. 14). Darin wird mittels eines idealisierten Experiments festgestellt, dass es möglich sei, die mittlere globale Durchschnittstemperatur durch SRM zu senken und dass dies eine Verminderung von Niederschlag nach sich zöge (Schmidt et al., 2012, S. 2).

Tatsächlich wurden Feldversuche zum SRM in Russland bereits durchgeführt, die die Effektivität von Aerosolen auf die Verminderung des Strahlungsantriebes bestätigten (Izrael et al.,

2009, S. 711). Die Aerosole wurden hierbei jedoch nicht in die Stratosphäre, sondern oberflächennah ausgebracht.

Auf dem Gebiet der Modellierungen zum SRM verdeutlicht Oeschle (2014, S. 5), dass Modelle, die verwendet werden, um die Auswirkungen der Maßnahmen zu erfassen, eben lediglich Abbildungen der Wirklichkeit seien. Fehlende Einspeisung wichtiger Parameter oder Vorgänge könne zu ungenauen Ergebnissen führen. Rickels et al. (2011, S. 2) beschreiben hingegen, dass, auch wenn Unwägbarkeiten in Modellen oder der Erprobung eliminiert würden, dies aufgrund der komplexen Klimamechanismen immer noch keine Garantie für eine gefahrlose Anwendung gebe.

Die Bewertung jener Auswirkungen könne aus Sicht der Deutschen Forschungsgesellschaft (DFG) derzeit nur im Rahmen von Modellrechnungen, noch nicht jedoch durch großskalige Feldexperimente verantwortungsvoll stattfinden (Beringer et al., 2014, S. 5).

Ein solches Feldexperiment müsste mindestens ein Jahrzehnt lang durchgeführt werden, um anhand eines Monitoring die Auswirkungen auf das Klimasystem erfassen zu können. Dies käme einem Feldversuch globalen Ausmaßes gleich, der nötig wäre, um das mikrophysikalische Verhalten der Aerosole in der Stratosphäre zu begreifen. (Heintzenberg, 2011, S. 4)

Robock et al. (2010, S. 530 - 531) schildern, dass SAI nur durch solch einen großflächigen Einsatz getestet werden könne.

Im Allgemeinen gebe es keine Pläne für eine Erprobung anhand Feldversuchen, da, neben anderen Gründen, die z. B. die gesellschaftliche Akzeptanz eines solchen Feldversuches betreffen (Rickels et al., 2011, S. 86), die Auswirkungen von großflächigen Feldversuchen nicht abgeschätzt werden können (Beringer et al., 2014, S. 4 & 42; Umweltbundesamt, 2016b²⁴). Dennoch fordern beispielsweise Dykema et al. (2014, S. 5) die Durchführung von Experimenten direkt in der Stratosphäre, um Erkenntnisse zu gewinnen, die mit Modellierungen oder Laborexperimenten nicht möglich sind.

3.2 Patente

Schon bevor die Debatte um SRM mit der Veröffentlichung von Paul Crutzen im Jahre 2006 erneut geführt wurde (Heintzenberg, 2011, S. 12), existierte eine Vielzahl an Patenten, die der, nach der theoretischen Erforschung möglicherweise stattfindenden, Erprobung dienlich sein könnten.

Zur Beeinflussung des Strahlungshaushaltes liegen 28 Patente vor (Oldham et al., 2014, S. 11). Im Folgenden werden die bekanntesten davon benannt.

Eines davon ist bekannt als „Stratospheric Welsbach seeding for reduction of global warming“ mit der Patentnummer US 5003186 A. Darin wird die Wirkungsweise beschrieben, wie

²⁴ Diese Quelle des Umweltbundesamtes bezieht sich auf einen Fragenkatalog, der zur Gewinnung aktueller Daten dienen soll. Der Fragenkatalog umfasst elf Fragen, die im August 2016 verschickt und vom Umweltbundesamt beantwortet wurden. Der Fragenkatalog ist in Anhang A zu finden.

Metallpartikel eine ausreichende Reflektivität der solaren Strahlung und einen ausreichenden Emissionsgrad der Wärmestrahlung der Erde ermöglichen könnten. Die Idee wird darin skizziert, dass diese Partikel dem Flugzeugtreibstoff beigemischt werden könnten, um sie in etwa zehn Kilometern Höhe auszubringen. (vgl. Chang, 1991)

Ein weiteres Patent „System and Method of Control of the Terrestrial Climate and its Protection against Warming and Climatic Catastrophes Caused by Warming such as Hurricanes“ mit der Patentnummer US 20090032214 A1 schlägt vor, die Verwendung von sonnenreflektierenden Treibstoffen verpflichtend für alle Flugzeuge einzuführen (vgl. Hucko, 2009).

Patent US RE29142 E mit dem Namen „Combustible compositions for generating aerosols, particularly suitable for cloud modification and weather control and aerosolization process“ hat bereits im Jahre 1977 die Möglichkeit von Verbrennungsprozessen von oxidierbaren Materialien zur Generierung von Aerosolen zum Gegenstand gemacht (vgl. Papee et al., 1977). Aluminium, Magnesium und Alkalimetalle gelten darin als besonders geeignete Materialien für die Verbrennung. Die Streuwirkung von Aluminium wird dabei besonders hervorgehoben.

In Zusammenhang mit der Ausbringung von Partikeln in flüssigem oder gasförmigem Zustand liegt das Patent „Apparatus and method for ejecting matter from an aircraft“ mit der Nummer US 5104069 A von 1992 vor, welches sich der Möglichkeiten des Ausstoßes von Stoffen aus Flugzeugen annimmt (Reising, 1992).

3.3 Technologische Gegebenheiten von SAI

3.3.1 **Wirkungsvorgang**

Die Idee hinter der Ausbringung von Aerosolen wurde bereits mit den Effekten des Vulkanausbruches des Pinatubo 1991 skizziert und wurde von Paul Crutzen im Jahre 2006 (Heintzenberg, 2011, S. 12; Rickels et al., 2011, S. 14) wiederaufgenommen.

Die Wirkungsweise der Aerosole ist den Auswirkungen eines Vulkanausbruches ähnlich. Dies ist nicht zuletzt so, weil der am meisten diskutierte Stoff, Schwefel, der Zusammensetzung der Aschepartikel nach einem Vulkanausbruch nachempfunden ist. Außerdem wurden zur Anwendung Partikel vorgeschlagen, die im Wesentlichen aus Aluminium(-verbindungen) bestehen (Umweltbundesamt, 2011a, S. 14; Keith, 2010, S. 16429).

Sulfataerosole vermögen durch Reflexion und Absorption solarer Strahlung die Erwärmung der Erdoberfläche zu verhindern, da jene solare Strahlung die Erdoberfläche nicht mehr erreicht. Auf den Strahlungsfluss der Wärmestrahlung haben Aerosole nahezu keinen Einfluss. (Klose, 2016, S. 244 – 245)

Diese SRM Methode bewirkt, großflächig angewendet, eine Abkühlung der bodennahen globalen Durchschnittstemperatur. Dies geschieht durch die Oxidation der ausgebrachten Schwefelverbindungen, denen dadurch die Eigenschaft zukommen würde, Licht ausreichend

zu streuen und somit zurück ins All reflektieren zu können (Umweltbundesamt, 2011a, S. 14). Das Potenzial, die Temperatur somit durch die Verminderung des Strahlungsantriebes rasch zu senken, ist groß (Rickels et al., 2011, S. 137). Mehrere W/m^2 können durch diesen Effekt erreicht werden (Rickels et al., 2011, S. 45). Anhand einer Erhöhung der Albedo um 1,8 % kann das für SRM mehrfach genannte „Ziel“, den Strahlungsantrieb um $4 W/m^2$ zu mindern, erreicht werden (vgl. Kapitel 2.2.2). Die Rückkopplungen, die sich dabei auf die ökologischen Systeme ergeben können, sind noch nicht bekannt (Osterhage, 2016, S. 7).

Die Royal Society (2009, S. 48) schätzt die Ausbringung stratosphärischer Aerosole auf ihr Potenzial hin, den Anstieg der globalen mittleren Durchschnittstemperatur abzuwenden, mit einer guten Erschwinglichkeit und Effektivität ein (s. Abbildung 6). Das IPCC sieht die Effektivität, dem bei einer verdoppelten CO_2 -Belastung vorhandenen Strahlungsantrieb, entgegenzuwirken, mit einer mittelgroßen Zuversicht (Pachauri et al., 2015, S. 89).

Im Gegensatz zu den in dieser Arbeit nicht behandelten Carbon Dioxide Removal (CDR) Technologien, hat das SAI keine direkte Wirkung auf den Kohlenstoffkreislauf, somit keinen reduzierenden Effekt auf das in der Atmosphäre vorliegende CO_2 . Es wird als symptomatische Kompensationsmaßnahme (Rickels et al., 2011, S. 9; 43) und nicht als Mitigationsmaßnahme begriffen (Pachauri et al., 2015, S. 127; Royal Society, 2009, S. 1).

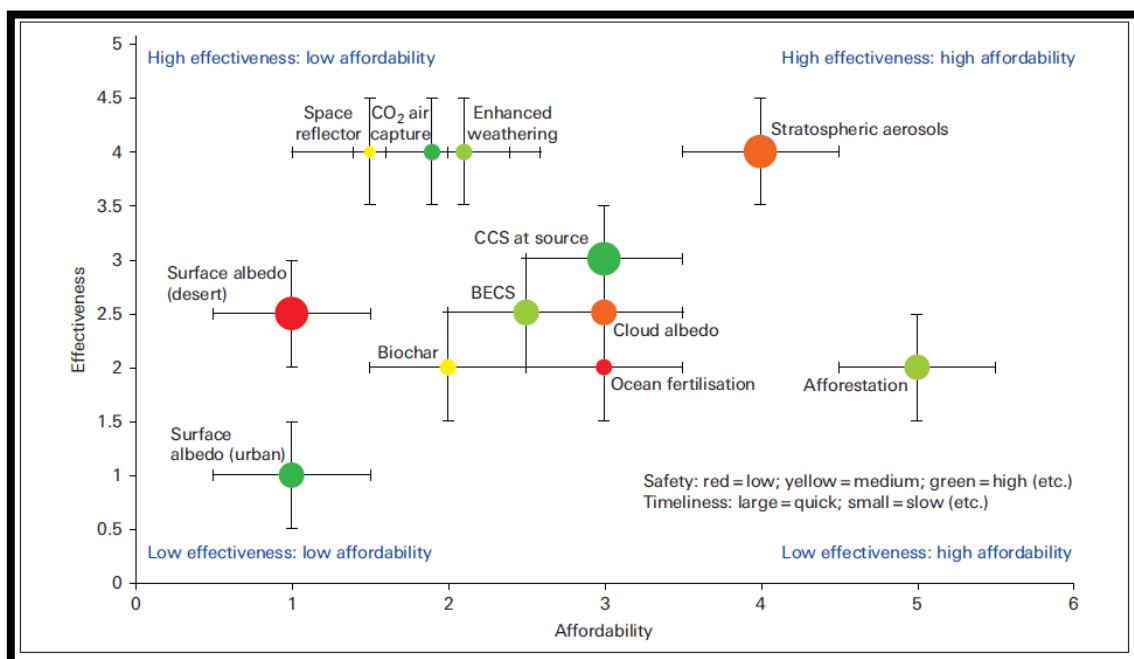


Abbildung 6: Einschätzung aller diskutierten CE Maßnahmen. Die Größe des Punktes signalisiert, wie schnell und effektiv die Technologie eingesetzt werden kann. Groß bedeutet „schnell“ einsetzbar, klein bedeutet „langsam“. Über die Sicherheit geben die Farben grün, gelb und rot und deren Farbmittel von „hohe“ Sicherheit (grün) bis „niedrige“ Sicherheit (rot) Aufschluss. Die Fehlerbalken geben den (unzureichenden) Rahmen an, in dem die Punkte bei eingehenderer Erforschung der Maßnahmen wiederzufinden sein könnten. (Quelle: Royal Society, 2009, S. 49).

Ziel der Ausbringung ist es, Aerosole in die untere Stratosphäre zu versprühen, um eine Verweilzeit von einem bis zu zwei Jahren zu gewährleisten (Rickels et al., 2011, S. 45; Chang & Shi, 1990). In der Troposphäre hätten sie eine wesentlich kürzere Lebensdauer (Royal Society, 2009, S. 29). Dabei gilt, dass umso höher die Schicht vorliegt, desto effektiver die Strahlung reflektiert werden kann (Rickels et al., 2011, S. 44).

In der Stratosphäre ist der Austausch von Luftmassen geringer als in der Troposphäre, was eine längere Aufenthaltszeit der Partikel ermöglicht (Umweltbundesamt, 2011a, S. 14). Um einen noch größeren Effekt zu erzeugen, werden von Keith (2010) bereits Aerosole in Nanopartikelgröße vorgeschlagen, die anhand photophoretischer Kräfte noch länger in der Stratosphäre verweilen können.

Die Höhe, in der die Aerosole injiziert werden sollen, wird verschieden beziffert. So gehen Rickels et al. (2011, S. 45) von 20 bis 25 km Höhe aus. Das Umweltbundesamt (2016a, S. 1) geht, leicht davon abweichend, von einer Höhe von 18 bis 25 km aus, wohingegen im Report zur Studie IMPLICC (Schmidt et al., 2012, S. 12) von einer Höhe von 15 bis 50 km die Rede ist. Im Allgemeinen finden immer wieder die Begriffe „untere Stratosphäre“ Verwendung. Das Patent von Chang & Shi (1990) spricht davon, die darin vorgeschlagenen Stoffe in der Größenordnung von 10 km auszubringen.

3.3.2 Diskutierte Aerosolmengen

Die Menge auszubringender Partikel von Daten bisher ausgebrochener Vulkane abzuleiten, ist nicht ohne weiteres möglich. Eine unerwartet schnelle Sedimentation der Aerosole muss erwartet werden, da sie einer hohen mikrophysischen Komplexität unterliegen. (Schmidt et al., 2012, S. 12)

Die quantitativen Schätzungen über die erforderlichen Aerosolmengen zur Beeinflussung des Strahlungshaushaltes variieren wegen der Größe der Partikel und der Region, in der sie ausgebracht werden, was in Abhängigkeit zu einer unterschiedlich stark ausgeprägten Minderung des Strahlungsantriebes steht (Umweltbundesamt, 2016a, S. 56 – 57). So sind für die Mengen an Aerosolen deren mikrophysikalischen Eigenschaften, die Ausbreitung in der Stratosphäre und deren Lebensdauer die maßgeblichen Faktoren (Umweltbundesamt, 2016a, S. 57). Auch zu welcher Zeit die Aerosole ausgebracht werden, verändert die Wirkung (Umweltbundesamt, 2011a, S. 15). Um einen Strahlungsantrieb von -4 W/m^2 zu erreichen sind die folgenden Stoffmengen vorgeschlagen worden:

Ältere Schätzungen gehen von 1,5 bis 5 Megatonnen (Schwefel) pro Jahr aus, die in die Stratosphäre freigegeben werden müssten, um die optimale Leistung bei der Reflektion solarer Strahlung erzielen zu können (vgl. Royal Society, 2009, S. 31).

Findet die Ausbringung von Nord nach Süd und als Schwefelwasserstoffverbindung statt, sind 20 Mt Schwefel nötig (Kiel Earth Institute, 2011, S. 15). Wird Schwefelsäure direkt verwendet, sind Mengen von 9 – 10 Mt pro Jahr möglich (Rickels et al., 2011, S. 63).

Die Wirksamkeit nimmt nicht proportional zur ausgebrachten Menge zu (Rickels et al., 2011, S. 45). Stetig ausgebrachte Mengen an Schwefeldioxid sind eher affin dafür, aneinander zu

haften und somit ihr Reflexionsvermögen zu senken. Höhere Schätzungen gehen im Falle kontinuierlich ausgebrachter Mengen daher von bis zu 75 Megatonnen Schwefeldioxid aus. (Kiel Earth Institute, 2011, S. 15)

Für die effektiver wirkenden Aluminiumoxid-Nanopartikel, die von Keith (2010, S. 16429) eingeführt werden, würde sich eine jährliche Menge von 0,1 Mt ergeben (Kiel Earth Institute, 2011, S. 15). Diese Aussage steht allerdings womöglich in Widerspruch zu aktuellen Forschungsergebnissen von Weisenstein et al. (2015, S. 11847, 11854), die das Potenzial zur Senkung des Strahlungsantriebes von Aluminium ähnlich dem von Sulfataerosolen einschätzen (vgl. Kapitel 3.4.2). Eine Korrektur nach oben – bezüglich der auszubringenden Menge – würde somit hinsichtlich der Aussage des Kiel Earth Institutes folgen.

Das Flugverkehrsaufkommen (bezogen auf das Ladegut), das nötig wäre, um 5 Megatonnen Schwefeloxid zu versprühen, würde weniger als ein Zehntel des jährlichen zivilen Luftverkehrs ausmachen (Royal Society, 2009, S. 32).

3.4 Verwendete Chemikalien

Neben den am häufigsten zur Verwendung geeigneten erwähnten Schwefelverbindungen werden weitere chemische Verbindungen diskutiert, die zum Einsatz kommen könnten. Im Rahmen des SPICE Projektes sind derzeit Titaniumdioxid, Siliciumcarbid, Siliciumdioxid, Diamant, Zinkoxid, Aluminiumoxid oder Kalziumkarbonat im Gespräch (SPICE, 2016). Auch die Royal Society (2009, S. 29) deutet an, dass andere Materialien als Sulfataerosole aufgrund geringerer Ausfällung und Verdampfung besser geeignet sein könnten, weniger diffuse Strahlung²⁵ zu generieren.

Kritische Faktoren bei der Wahl des optimalen Aerosoles sind Größe, Form, Dichte und die mikrophysikalischen Wachstumseigenschaften (Benduhn & Lawrence, 2013, S. 7918). Diese Eigenschaften werden sowohl um ihre Fähigkeit solare Strahlung zu reflektieren, als auch um Verlusten durch Auftrieb und Sedimentation zu erfassen, herangezogen.

Im Folgenden wird näher nur auf die beiden Stoffe eingegangen, die am häufigsten Erwähnung in den Publikationen zum SRM fanden: Schwefelverbindungen und Aluminiumoxid.

²⁵ Sonneneinstrahlung, die – im Gegensatz zu direkter Sonneneinstrahlung – durch Reflexion und Streuung indirekt auf die Erde trifft, wird als *diffuse Strahlung* bezeichnet (Malberg, 2007, S. 45).

3.4.1 Schwefelverbindungen

In den Publikationen der an der Forschung beteiligten, Institutionen wird vielfach die Verwendung von Sulfataerosolen genannt, die aus Schwefeldioxid und Schwefelsäure hervorgehen (Keith, 2010, S. 16428; Umweltbundesamt, 2016a, S. 37).

Sulfataerosole bilden sich durch Oxidation und Kondensation von Schwefelsäure (H_2SO_4), die entsteht, nachdem Schwefeldioxid (SO_2) in die Stratosphäre eingebracht wurde (Heintzenberg, 2011, S. 12). Die Einbringung von SO_2 ist daher eine indirekte Maßnahme zur Bildung von Sulfataerosolen (Umweltbundesamt, 2016a, S. 47). Dieses indirekte Vorgehen zur Erzeugung von Sulfataerosolen hat den Effekt, dass die entstehenden Aerosolpartikel zu groß werden können, um effektiv solare Strahlung zu reflektieren (Pierce et al., 2010, S. 1).

Schwefelsäure kann auch direkt in die Stratosphäre eingebracht werden. Sie hat die Eigenschaft, bei höheren Temperaturen (in der oberen Stratosphäre) kleine Partikel zu großen Partikeln zu verbinden, da ausreichend hoher Dampfdruck besteht. Dies erschwert auf der anderen Seite, die erwünschte Partikelgröße zu sichern (Keith, 2010, S. 16428).

Schwefelsäure erzeugt durch die Absorption von Wärmestrahlung eine Erwärmung der unteren Stratosphäre, grob proportional zur ausgebrachten Menge. Reduziert man die Menge, welche direkt in die untere Stratosphäre eingebracht wird, indem man die Partikelgröße optimiert, besteht jedoch das Potenzial, eine dortige Erwärmung vermeiden zu können. (Pierce et al., 2010, S. 1)

Das effektivste Rückstrahlungsvermögen haben Sulfataerosole bei einem Partikelradius von 0,3 Mikrometern. Partikel, die größer oder kleiner sind, büßen an Effizienz ein (Keith, 2010, S. 16428). Sind die Partikel wesentlich größer, haben sie die Eigenschaft, Wärmestrahlung zu streuen und würden somit zur Erwärmung der globalen Durchschnittstemperatur beitragen (Royal Society, 2009, S. 29) und Verluste durch Sedimentation erzeugen (Schmidt et al., 2012, S. 12). Sind die Partikel hingegen wesentlich kleiner, werden sie aufgetrieben und durch den globalen Zirkulationsmechanismus der Stratosphäre²⁶ ausgesondert (Schmidt et al., 2012, S. 12).

Es ist anzumerken, dass bereits jährlich eine Menge von 100 Megatonnen Schwefeldioxid, in gleichen Teilen durch industrielle Anlagen wie Kraftwerke und durch Vulkane, in die Stratosphäre eingetragen wird (Gibbs, 2009, S. 13). Diese Emissionen bewirken, dass sich die globale Erwärmung im vergangenen Jahrhundert nicht noch höher ereignet hat (Asilomar Conference, 2010, S. 10).

Des Weiteren hat direkt injizierte Schwefelsäure eine längere Lebensdauer als die durch Schwefeldioxid entstandene und kann mit einer 50 – 60 %-igen Reduktion ausgebrachter Menge – im Gegensatz zu Schwefeldioxid – dieselbe Leistung erzielen, Strahlungsantrieb zu mindern (Pierce et al., 2010, S. 3 – 4).

²⁶Die Brewer Dobson Zirkulation ist die dominierende Zirkulation in der Stratosphäre. Sie vermag Luftmassen und Stoffe über den gesamten Globus zu transportieren. (Umweltbundesamt, 2016, S. 5)

3.4.2 Aluminium

Aufgrund seiner im Vergleich zu Sulfataerosolen vierfach besseren Kapazität, Licht zu streuen, diene Aluminium in Oxidform (Al_2O_3) ebenfalls als Möglichkeit eines verwendbaren Aerosoles (Pierce et al., 2010, S. 4).

Eine neuere Studie zeigt, dass Aluminiumoxid-Partikel bei optimaler Größe eine dreifach höhere Streuungskapazität haben als Sulfataerosole. Die höhere Streuungskapazität werde allerdings durch die höhere Massendichte der Aluminiumoxid-Partikel im Gegensatz zu Sulfataerosolen relativiert.²⁷ Weisenstein et al. (2015, S. 11844)

Anhand dieser neueren Studie wird deutlich, dass zum Erreichen eines um 2 W/m^2 reduzierten Strahlungsantriebes, etwa die gleiche Menge Al_2O_3 ausgebracht werden müsste, wie es für Sulfataerosole der Fall wäre (vgl. Weisenstein et al., 2015, S. 11854).

Keith (2010, S. 16430) beschreibt die Möglichkeit, magnetische oder elektrostatische Partikel aus Aluminiumoxid und Bariumtitanat (s. Abbildung 7) in Nanometergröße zu nutzen, die mittels photophoretischer Kräfte²⁸ über die Stratosphäre hinaus aufgetrieben werden können.

Die diffuse Sonneneinstrahlung auf der Erdoberfläche könnte durch die Nutzung solcher Partikel aus Aluminiumoxid und Bariumtitanat – im Gegensatz zu Sulfaten – stark vermindert werden, was einen weniger weiß-färbenden Effekt auf den Himmel nach sich zieht (Keith, 2010, S. 16429). Auch Weisenstein et al., (2015, S. 11844, 11854) thematisieren die, im Gegensatz zu Sulfataerosolen um die Hälfte reduzierbare diffuse Strahlung durch Aluminiumoxid-Partikel in Nanometergröße.

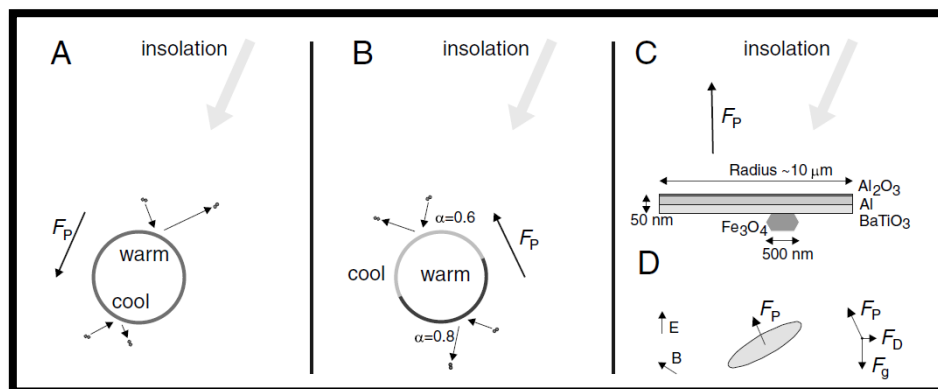


Abbildung 7: Wirkweise photophoretischer Kräfte auf ein Aerosolpartikel aus Aluminiumoxid und Bariumtitanat. (Quelle: Keith, 2010, S. 16429).

²⁷ Die Dichte von Aluminiumoxid wird mit $3,8 \text{ g/cm}^3$, die von stratosphärischer Schwefelsäure etwa $1,7 \text{ g/cm}^3$ angegeben. Aluminiumoxid-Partikel sedimentieren somit schneller als Sulfataerosole. Weisenstein et al. (2015, S. 11840)

²⁸ Photophoretische Kräfte werden erzeugt, wenn eine Temperaturdifferenz zwischen dem durch die Sonnenstrahlung erwärmten Aerosol und der Umgebungstemperatur entsteht. Die aufgewärmte Seite des Aerosoles sorgt für einen Auftrieb des Partikels. Das Moment, das dabei durch Magnetismus oder Elektrostatik – stärker als das Gravitationsmoment – auf die Aerosole wirkt, kann bei speziell hergestellten Aerosolen, die kleiner als 100 nm sind, genutzt werden. Mit natürlich vorkommenden Aerosolen ist eine solche Dynamik nicht möglich. (Keith, 2010, S. 16428 – 16429)

Um die o.g. Effekte zu erreichen ist eine optimale Größe der Partikel zu gewährleisten. Weisenstein et al. (2015, S. 11853) benennen die optimale Größe von Aluminiumoxid-Partikeln mit etwas mehr als 200 nm.

Sind die Partikel kleiner, entsteht eine größere Partikelkonzentration, was die Koagulation mehrerer Partikel zur Folge hätte und sowohl die Sedimentation begünstigen, als auch das Streuvermögen eingrenzen würde (vgl. Weisenstein et al., 2015, S. 11841, 11845).

Sind die Partikel hingegen größer, haben sie zwar eine leicht erhöhte Streuung in Relation zu etwas kleineren Partikeln, jedoch sedimentieren sie rasch (Weisenstein et al., 2015, S. 11845).

Durch die große Höhe, in der die Partikel vorliegen, kann außerdem eine Reaktion mit der Ozonschicht verhindert werden (Keith, 2010, S. 16428). Der durchschnittliche Abbau der Ozonsäule²⁹ bei der Nutzung von Aluminiumoxid liege bei etwa 5,6 %. Zum Vergleich für Sulfataerosole belaufe sich der Mittelwert auf bis zu 13 %. Eine hohe Unsicherheit wird diesen Aussagen zugrunde gelegt. Weisenstein (2015, S. 11847)

Darüber hinaus besitzt Aluminiumoxid die Eigenschaft, Wärmestrahlung weniger zu absorbieren als Sulfataerosole, was eine unerwünschte Erwärmung der unteren Stratosphäre vermeiden könnte³⁰ und somit zusätzlich zu einem geringeren Abbau von Ozon führen würde (Pierce et al., 2010, S. 4; Benduhn & Lawrence, 2013, S. 7916).

3.5 Mögliche Auswirkungen / Nebenwirkungen von SAI

Durch die Eingriffe in den Strahlungshaushalt ergeben sich vielfältige Auswirkungen auf das Ökosystem der Erde. Um dem Umfang dieser Arbeit Rechnung zu tragen, werden lediglich exemplarisch einige konkrete mögliche Auswirkungen des SAI vorgestellt.

Sulfataerosole bewirken, dass das Verhältnis von diffuser zu direkter Sonneneinstrahlung auf die Oberfläche steigt. Ein Effekt davon ist die Weißfärbung des Himmels (Keith, 2010, S. 16428). Die möglichen Auswirkungen dessen betreffen sowohl den Menschen (s. Kapitel 3.5.3), die Biodiversität (s. Kapitel 3.5.2.2) und die Leistungsausbeute von Solaranlagen (Keith, 2010, S. 16428; Renn et al., 2011, S. 40) und bedürfen somit im Folgenden einer Kategorisierung, um Überschneidungen zu vermeiden.

Im Allgemeinen sind jedoch die Auswirkungen, die sich durch SRM ergeben könnten, nicht in ihrem ganzen Umfang im Vorfeld zu erfassen (Royal Society, 2009, S. 38; Umweltbundesamt, 2016b). Im Allgemeinen lässt sich vorab festhalten, dass Maßnahmen zum SRM weder die Treibhausgaskonzentration noch andere, mit dem Klimawandel in Verbindung gebrachte, Folgen wie z. B. die Ozeanversauerung adressieren (Rickels et al., 2011, S. 137 – 138).

²⁹ Die Ozonsäule gibt die Dicke einer Schicht Ozon an, wenn sie bei einem Druck von 1013 hPa und 0 °C zusammengedrückt würde. Die Dicke der Ozonsäule wird dabei in der *Dobson Unit* (DU) angegeben. Eine DU entspricht 10^{-5} m. (vgl. IPCC, 2013, S. 1452)

³⁰ Weisenstein et al. (2015, S. 11846) beziffern diese Eigenschaft mit einer vier bis fünf Mal geringeren Erwärmung der unteren Stratosphäre im Vergleich zu Sulfataerosolen.

3.5.1 Auswirkungen auf die Atmosphäre

Dem Ausbruch des Vulkanes „Pinatubo“ und des „El Chichón“ folgte eine um 25 bis 35 Prozent weniger starke direkte solare Strahlung, die die Erdoberfläche erreichte. Im Vergleich dazu ist zu nennen, dass eine Reduzierung der solaren Strahlung um 1,8 % notwendig wäre, um dem Strahlungsantrieb entgegenzuwirken, der sich bei einer Verdopplung der CO₂-Konzentration einstellen würde. (Robock, 2008, S. 16)

Die erhöhte diffuse Strahlung bei der Ausführung von SRM mit Sulfataerosolen, würde dabei den Himmel tagsüber weiß erscheinen lassen.

Besonders vor dem Hintergrund zum Schutz der Ozonschicht sind die Auswirkungen des SRM zu betrachten. Das Umweltbundesamt (2016a, S. 10) fand in einer Simulation heraus, dass verschiedene Mengen des Sulfataerosoles unterschiedlich starken Einfluss auf die Zu- oder Abnahme des stratosphärischen Ozons haben.

So sind in einer Modellierung für die Zone beim nullten Breitengrad (Äquator) Abnahmen in Bezug auf die Ozonsäule im mehrjährigen Mittel durch die Ausbringung von Sulfataerosolen zu beobachten (s. Abbildung 8). Die Abnahme des Ozons ist bei Ausbringung am Äquator in etwa proportional zur ausgebrachten Aerosolmenge. (Umweltbundesamt, 2016a, S. 61)

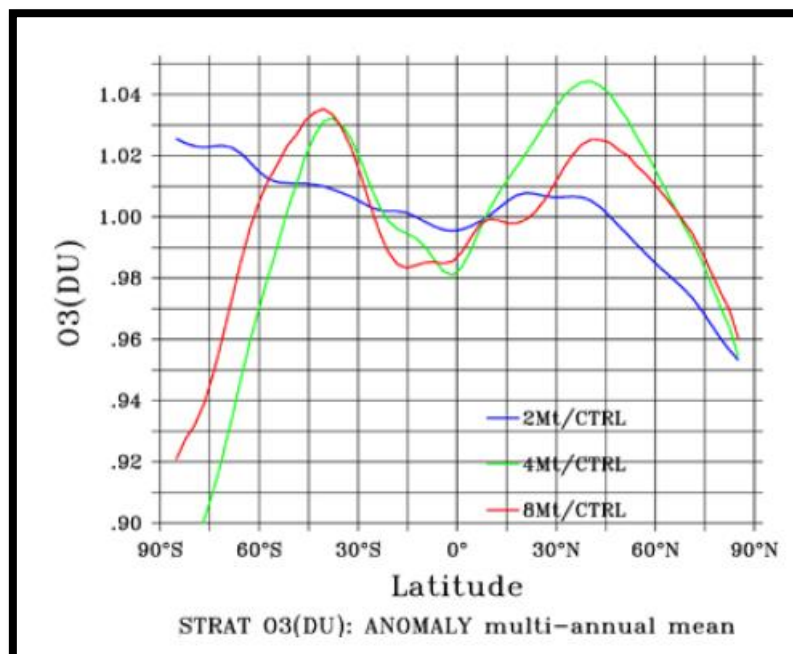


Abbildung 8: Veränderung der Ozonsäule im mehrjährigen Mittel bei Simulationen von je 2, 4 und 8 Megatonnen Sulfataerosolen pro Jahr in Abhängigkeit zum Breitengrad. Zu- und Abnahmen beziehen sich auf eine ebenfalls mehrjährige Kontrollsimulation ohne die Einbringung von Sulfataerosolen. Der Wert von 1,0 beschreibt, dass bei der Betrachtung der Simulationen durchläufe mit und ohne Einbringung von Aerosolen keine Veränderung in der Ozonsäule vorliegt. Mehr als 1,0 bedeutet, dass das Ozon zunimmt, weniger als 1,0 bedeutet, dass es abnimmt. (Quelle: Umweltbundesamt, 2016a, S. 11).

In Abbildung 8 ist erkennbar, dass etwa bei 45° südlicher und nördlicher Breite das Ozon etwas zunimmt und – mit Ausnahme vom Südpol bei der Einbringung von 2 Megatonnen Sulfataerosolen pro Jahr – sowohl der Süd- als auch der Nordpol unter einem Abbau von Ozon zu leiden hätten (Schmidt et al., 2012, S. 13).

Darüber hinaus können stratosphärische Aerosolinjektionen auch einen Einfluss auf die Dynamik zwischen Tropos- und Stratosphäre haben. Diese Prozesse müssen noch besser verstanden werden und können noch nicht abgeschätzt werden (Schmidt et al., 2012, S. 22).

Dykema et al. (2014, S. 2) bestätigen dies und ergänzen, dass bisherige Modelle lediglich die Dynamik von Aerosolen, jedoch nur unzureichend deren Austausch zwischen Tropos- und Stratosphäre abzubilden vermochten und deren chemischen Reaktionen mit Ozon außer Acht ließen.

Dykema et al. (2014, S. 3) benennen Reaktionen von Aerosolen, die Temperatur der Stratosphäre und Wasserdampf als diejenigen Parameter, die die Verminderung stratosphärischen Ozons begünstigen³¹. Wie bereits beschrieben haben Sulfataerosole einen direkten Effekt auf den Abbau von Ozon.

Durch SAI kann die Abkühlung der Tropopause in den Tropen (engl.: *tropical tropopause layer*, kurz: TTL) die Abnahme von Wasserdampf in der Stratosphäre als indirekter Effekt auftreten. Ein dem entgegengesetzter indirekter Effekt wäre, dass durch eine erhöhte Menge ausgebrachter Aerosole die Temperatur derart ansteigt, dass sich zunehmend Wasserdampf in der Stratosphäre bildet, was einen Ozonverlust zur Folge hätte. Um in Erfahrung zu bringen, welcher Effekt tatsächlich überwiegt, seien kontrollierte Experimente in der Stratosphäre nötig. (Dykema et al., 2014, S. 5)

Der Wirkungspfad ‚SRM – surface temperature – TTL temperature – water vapour‘ (vgl. Abbildung 9) kann zu vermindertem Wasserdampf führen, wenn die von SRM hervorgerufene Abkühlung im Vordergrund steht (Dykema et al., 2014, S. 5). Dazu müsste gewährleistet sein, dass die Troposphäre sich durch verminderte CO₂-Konzentrationen nicht so stark erwärmt (vgl. Kapitel 3.5.2.1).

³¹ Diese Prozesse sind diejenigen Faktoren, die hauptsächlich die Inkraftsetzung von Chloroxid (ClO) in der unteren Stratosphäre begünstigen. Gesteigerte Mengen an ClO fördern den Abbau von Ozon. (Dykema et al., 2014, S. 3)

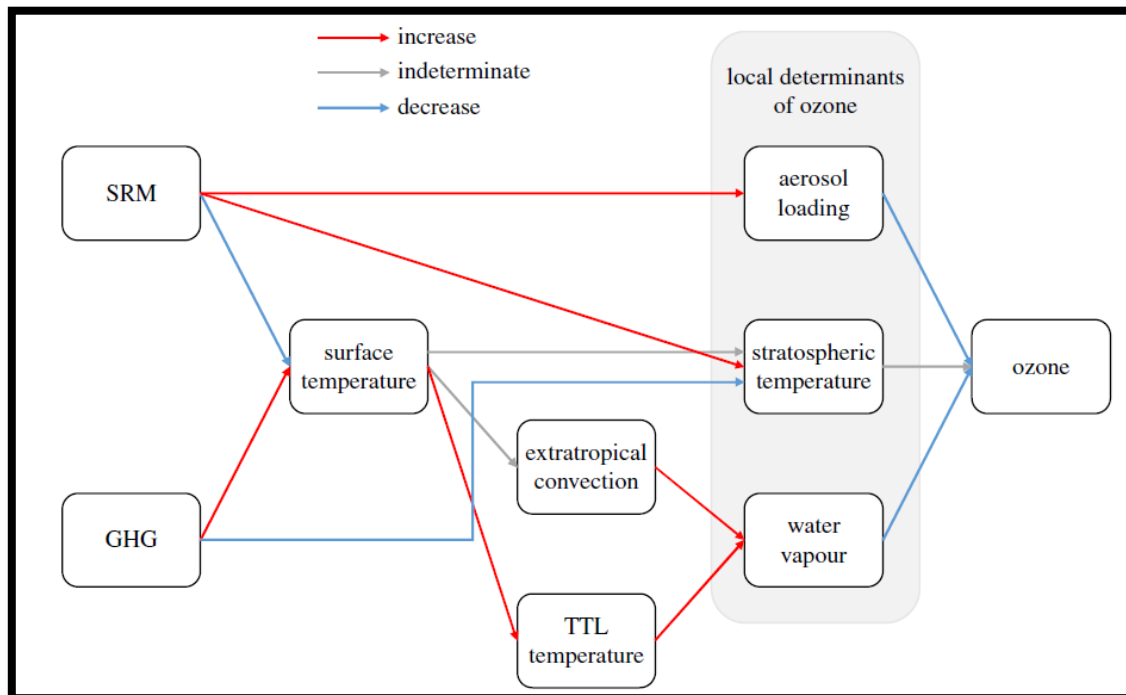


Abbildung 9: Auswirkungen von Treibhausgaskonzentration und Solar Radiation Management auf das Ozon. (Quelle: Dykema et al., 2014, S. 4).

Dass chemischen und dynamischen Prozessen eine große Bedeutung zukommt, beobachtete auch das Umweltbundesamt (2016a, S. 61 – 64) in Simulationen, in denen eine gesteigerte Menge an ausgebrachtem Schwefelmaterial keine im gleichen Maße gestiegene Aerosolpartikelmenge erzeugte, da das Mehr an Schwefelmaterial auf bereits vorhandenen Aerosolpartikeln kondensierte.

Die Einbringung von Schwefeldioxid könnte zudem die Minderung von Niederschlägen bedingen und hat Einflüsse auf die asiatischen und afrikanischen Monsune (Robock et al., 2008, S. 1).

Die Zunahme an saurem Regen durch die SO_2 -Injektionen wird nicht als nennenswerteres Problem angesehen, da die Zunahme am globalen Schwefelhaushalt in der Atmosphäre durch bereits vorhandene Emissionen von Vulkanen als gering eingestuft wird (Royal Society, 2009, S. 32). Robock (2008, S. 16) entgegnet dem, dass nicht die Zunahme der Schwefelmenge relevant sei, sondern die Gesamtmenge, die sowohl in flüssiger als auch in fester Form (Partikel) auf die Erde gelangen und möglicherweise die Erreichung eines biologischen Kippunktes begünstigen könnte.

Es ist jedoch auch möglich, dass davon abweichende Prozesse stattfinden und die von einer Vulkanexplosion erwarteten Auswirkungen nicht eintreten (Umweltbundesamt, 2011a, S. 15).

Das Planungsamt der Bundeswehr (2012, S. 18) deutet am Rande an, dass es im Absinken des vorgeschlagenen Materials in die Troposphäre eine Gefahr für den Flugverkehr und die Umwelt sieht.

3.5.2 Auswirkungen auf Ökosysteme der Erde

Osterhage (2016, S. 18) zählt die Abkühlung der Tropen, die Abschwächung von Wasserkreisläufen, die Beeinflussung des Energiehaushaltes der Erde, eine mögliche Meeresversauerung und die Beeinflussung der Nahrungskette zu den Nebenwirkungen, die sich für die Erde ergeben könnten.

Die Abkühlung, die das SRM bezwecken soll, betrifft die globale bodennahe Durchschnittstemperatur. Die Temperaturveränderung kann nach einer 50-jährigen Anwendung mit $0,12 \pm 0,35$ K angegeben werden³² (Jones et al., 2013, S. 9745). Ein Kippelement (vgl. Kapitel 2.1.3), dem auf eine gleichmäßige Abschwächung der solaren Strahlung eine erhebliche Veränderung folgen könnte, ist zum Beispiel das arktische Meereis (Royal Society, 2009, S. 34; Robock et al., 2008, S. 13). Die folgenreichsten möglichen Auswirkungen auf durch SAI beeinflusste Ökosysteme werden im Folgenden benannt.

3.5.2.1 Wasserkreislauf der Erde

Nach dem Ausbruch des Vulkanes Pinatubo im Jahre 1991, wurde ein deutlicher Schwund des Regens über dem Festland festgestellt. Darüber hinaus gab es einen stark verminderten Oberflächenabfluss in den Ozean (Bala et al., 2008, S. 7664).

Kleidon und Renner (2013, S. 463) zeigen im Zuge dessen, dass sich Änderungen der solaren Strahlung stärker auf den Wasserkreislauf auswirken als Änderungen in der Treibhausgaskonzentration. Es wird besonders dadurch deutlich, dass die solare Strahlung einen stärker erwärmenden Effekt auf die Erdoberfläche hat als Treibhausgase und somit 1 % mehr Verdunstung erzeugt (Kleidon und Renner, 2013, S. 455). Dies lässt sich damit erklären, dass der durch das Treibhausgas CO₂ entstandene Strahlungsantrieb hauptsächlich die Troposphäre, der von solarer Strahlung ausgehende Strahlungsantrieb dagegen die Erdoberfläche erwärmt (Bala et al., 2008, S. 7666). Ein ‚Weniger‘ an Sonneneinstrahlung hat demnach ein ‚Weniger‘ an Regen zur Folge, was mit der o.g. deutlicheren Auswirkung von solarer Strahlung auf den Wasserkreislauf zu erklären ist.

Kleidon & Renner (2013, S. 463) kommen zu dem Schluss, dass es unwahrscheinlich sei – durch die Nutzung von SRM – die ursprünglichen klimatischen Verhältnisse wiederherzustellen, da der hydrologische Kreislauf unterschiedlich auf Erwärmung durch solare Strahlung oder durch veränderte Treibhausgaskonzentrationen reagiere.

Eine besondere Auswirkung des SRM betrifft die Verminderung des weltweiten Niederschlages. Die Differenzen im Niederschlag werden, wie bereits erwähnt, hauptsächlich vom Strahlungsfluss an der Oberfläche der Erde bestimmt. Dies verdeutlichen Bala et al. (2008, S. 7665) in einer vereinfachten Simulation für den Fall einer verdoppelten CO₂-Konzentration³³, dem eine Zunahme des globalen mehrjährigen mittleren Niederschlages um 3,7 % folgen

³² Die von Jones et al. (2013, S. 9745) analysierten Simulationen zeigen somit, dass die Abkühlung eine Durchschnittstemperatur bewirkt, die vorindustriellem Niveau entspricht.

³³ Die verdoppelte CO₂-Konzentration in dieser Simulation wird mit 710 ppm angegeben.

würde. Für den Fall einer verdoppelten CO₂-Konzentration *und* dem Einsatz von SRM mit einer Erhöhung der Albedo um 1,8 % (vgl. Robock, 2008, S. 16), würde eine Minderung des globalen mehrjährigen mittleren Niederschlages von 1,7 % folgen. Dies verdeutlicht zudem die Kausalität von Strahlungsbudget und Niederschlagsveränderungen.

Regional können die Niederschlagsverhältnisse aufgrund klimatischer Begebenheiten in einigen tropischen Regionen anders zutreffen und würden dort beispielsweise eine Zunahme der Niederschläge erwarten lassen (Bala et al., 2008, S. 7765).

Im Zusammenhang mit dem Wasserkreislauf stehen Dürren oder Fluten, die sich aus Änderungen in den globalen Niederschlagsmustern ergeben könnten und von der SRMGI (2012, S. 16) als mögliche Gefahren eines Einsatzes von SRM angesehen werden. Robock (2008, S. 15) führt an, dass Dürren, die durch SRM eintreten könnten, hunderte von Millionen von Menschen betreffen könnten. Sollte dies eintreten, hat dies Auswirkungen auf die Nahrungsmittelproduktion (Royal Society, 2009, S. 31). Welche Auswirkungen das konkret bedeuten würde, bleibt offen. Der Effekt, dass SAI Dürren verursachen kann, wird weiterhin in den einschlägigen Studien nicht thematisiert.

Das IPCC sieht für SRM keine Auswirkungen für die Versauerung der Ozeane, jedoch können noch weitere unbekannte Auswirkungen eintreten, die bisher noch keine Beachtung fanden (Pachauri et al., 2015, S. 89).

Sulfataerosole können den Niederschlag beeinflussen und führen zu sog. „saurem Regen“ (Umweltbundesamt, 2016b). Folgen, die sich daraus für den Wasserkreislauf ergeben, betreffen die Versauerung von Gewässern, das eine erhöhte Mobilisierung von Schwermetallen, Nährstoffen und Aluminium begünstigen kann. *Waldsterben*³⁴ und die Verockerung³⁵ von Brunnen könnten weitere Folgen sein (Umweltbundesamt, 2016b).

3.5.2.2 Bioproduktivität

Als bedeutenden Effekt auf die Kohlenstoffsенke sehen Mercado et al. (2009, S. 1) die Auswirkungen der diffusen Sonneneinstrahlung. So schätzen die Autoren, dass zwischen 1960

³⁴ Waldsterben ist das großflächige Absterben von Bäumen (Baumsterben), das zuerst bei Weißtannen beobachtet wurde (Tannensterben). [...] Seit etwa 1975 treten jedoch auch in emittentenfernen Gebieten unterschiedl. neuartige Waldschäden auf. Diese Entwicklung wurde zunächst an Nadelbäumen beobachtet, hat aber in den letzten Jahren nahezu alle Waldbaumarten erfasst. Charakterist. Symptome sind: 1) Verfärbung und Abwurf von Nadeln oder Blättern (Verlichtung der Krone); 2) große Schäden im Feinwurzelsystem, wodurch die Wasser- und Nährstoffaufnahme des Baumes vermindert wird; 3) Wachstumsstörungen. [...] Als Schadfaktoren gelten der saure Regen, die durch Kfz, Haushalte, Industrie und Landwirtschaft erzeugten Stickstoffoxide, Schwermetalle, Photooxidantien und Ammoniak. (Der Brockhaus, 2002, Band 15, Artikel Waldsterben).

³⁵ Verockerung beschreibt den Vorgang, bei dem sich Filterflächen in Brunnen durch Wasserinhaltsstoffe „verfüllen“. Ausfällungen von Eisen- und Manganverbindungen sind dabei für die Verockerung charakteristisch. (Smoltczyk, 1996, S. 380 – 381)

und 1999 die Kohlenstoffsénke zu Lande durch das sich in diesen Jahren ereignete Global Dimming³⁶ um etwa ein Viertel gewachsen ist.

Durch die Streuung des Lichtes durch die Aerosole erreicht weniger direkte Strahlung die Erde. Eine durch SAI Maßnahmen gesteigerte diffuse Strahlung hätte einen effizienzsteigernden Effekt auf Photosynthese. (Mercado et al., 2009, S. 1014)

Durch direkte Sonneneinstrahlung beschienene Blätter in den Schirmen³⁷ der Vegetation kann das eintreffende Licht nicht optimal genutzt werden, weil jene Blätter bereits lichtgesättigt sind. Bei Bewölkung oder Aerosolen, die diffuse Strahlung erzeugen, sinkt dadurch die Kapazität der oberen Blätter, lichtgesättigt zu sein. Eine gleichmäßigere Photosynthese verschiedener Schichten der Vegetation wäre somit möglich (Mercado et al., 2009, S. 1014). Die Poren in der Blattunterseite können zudem länger geöffnet bleiben, wenn sie sich durch die diffuse Sonneneinstrahlung nicht so sehr erhitzen und dadurch weniger Wasser absondern. Dies verhilft den Pflanzen ebenfalls zu einer effektiveren Photosynthese (Robock, 2014, S. 176).

Die Pflanzen würden somit als Kohlenstoffsénke dienen. Dem Ausbruch des Pinatubo folgte die Beobachtung über die Zunahme der Kohlenstoffsénke im Umfang von 1.000 Mt (Robock, 2014, S. 176 – 177).

Würden Aerosolpartikel mit scheibenmäßiger Geometrie verwendet werden, auf die photo-phoretische Kräfte wirken könnten, gäbe es keinen Zuwachs an diffuser Strahlung (Keith, 2010, S. 16429).

Die mögliche Verwendung von Aluminiumoxid als Aerosol hat der State of Rhode Island (2016, S. 3) in einem Gesetzesentwurf als schädigend für Agrarflächen betrachtet. Darüber hinaus beschreibt das Kiel Earth Institute (2011, S. 98), dass der Zuwachs in diffuser solarer Strahlung in einer gesteigerten Produktivität der Landwirtschaft resultiere.

3.5.2.3 Abbruch von SRM Maßnahmen

Die erwünschte Wirkung eines möglichen Einsatzes von SRM – die Abkühlung der globalen mittleren bodennahen Durchschnittstemperatur – könnte rasch ins Gegenteil umschlagen, wenn die Maßnahmen abgebrochen werden würden (Pachauri et al., 2015, S. 89). Matthews & Caldeira (2007, S. 9951 - 9952) sprechen von einer 10- bis 20-fach vergrößerten Temperaturzunahme, sollten SRM Maßnahmen schlagartig abgebrochen werden, je nachdem, nach welchem Zeitraum sie abgebrochen würden. Abbildung 10 schlüsselt auf, wie die Temperatur ansteigt, wenn zu verschiedenen Zeitpunkten die Maßnahmen abgebrochen würden.

³⁶ Als Global Dimming wird die Minderung der auf der Erdoberfläche ankommenden solaren Strahlung bezeichnet (Wild et al., 2005, S. 847). Sie wird von Klose (2016, S. 246) mit einer Reduktion um 3,8 W/m² in den vergangenen Jahrzehnten beziffert.

³⁷ Schirm meint jeweils die oberste Schicht einer zur Photosynthese fähigen Vegetation wie z. B. die oberen Blätter einer Baumkrone.

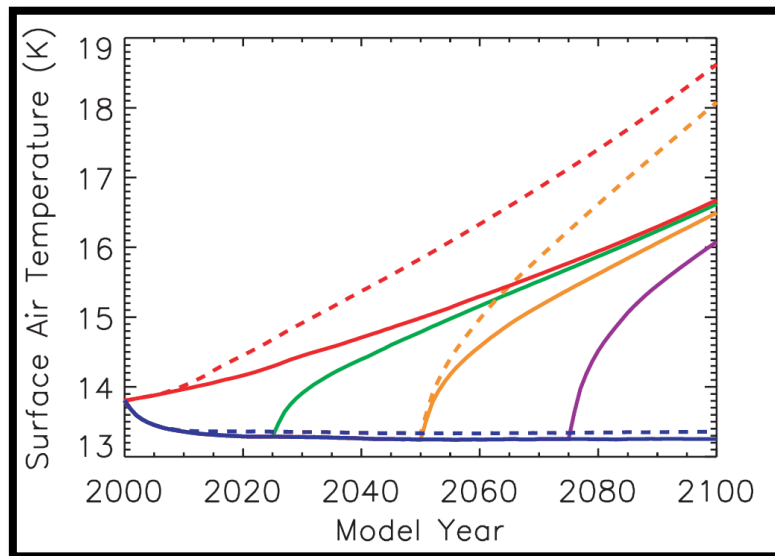


Abbildung 10: Bodennahe Temperaturen für Simulationsdurchläufe von SAI und dem Abbruch nach 25, 50 und 75 Jahren, startend im Jahre 2000. (blau): Einsatz von SRM; (rot): Kontrollsimulation mit steigenden CO_2 -Konzentrationen³⁸; (grün): im Jahre 2025 abrupt abgebrochenes SRM; (gelb): im Jahre 2050 abrupt abgebrochenes SRM; (violett): im Jahre 2075 abrupt abgebrochenes SRM. Gestrichelte Linien geben eine verdoppelte Klimasensitivität an. (Quelle: Matthews & Caldeira, 2007, S. 9951).

Abbildung 11 zeigt anhand von Ergebnissen der Studie von Jones et al. (2013), wie welt-raumbasiertes SRM³⁹ die Temperatur beeinflussen kann. Elf verschiedene Klimamodelle wurden für diese Simulationen herangezogen. Die Grafik zeigt, dass für alle Modelle die Temperatur bei eingesetzten welt-raumbasierten SRM Maßnahmen sinkt und mit abruptem Stopp nach einer Laufzeit von 50 Jahren stark ansteigt.⁴⁰

Parallel dazu verläuft die Simulation, die den Temperaturanstieg infolge eines Anstieges der CO_2 -Konzentration um 1 % pro Jahr, ebenfalls idealisiert, darstellt.⁴¹

Nach einem abrupten Abbruch der SRM Maßnahme steigt die Temperatur auf das Niveau der infolge gesteigerter CO_2 -Konzentration erhöhter Temperatur an (s. Abbildung 11). Die nördliche Hemisphäre ist dabei stärker betroffen als die südliche. Mit etwa 2,4 K pro Jahrzehnt könnte sich nach einer Beendigung von SRM die Arktis erwärmen.

Die Rate der Temperaturzunahme, die sich nach einem Abbruch von SRM mittels stratosphärischen Aerosols ergeben würde, ist etwas geringer, jedoch vergleichbar. Um den gewöhnlichen Strahlungshaushalt wiederherzustellen, würde der Abbau von stratosphärischem

³⁸ Die Kontrollsimulation (rot) geht von einer globalen Erwärmung von 3,5 °C für die Jahre von 1900 bis 2100 infolge gesteigener atmosphärischer CO_2 -Konzentrationen von 280 auf 880 ppm aus.

³⁹ Vgl. Kapitel 2.2.3.4

⁴⁰ Die Trends der Kurven geben hierbei lediglich eine idealisierte Angabe über den möglichen Verlauf der Temperaturveränderungen.

⁴¹ Ein Anstieg von 1 % in der CO_2 -Konzentration hat eine Vervielfachung der CO_2 -Konzentration (ggü. vorindustriellem Niveau) nach etwa 140 Jahren zur Folge (Jones et al., 2013, S. 9744).

Aerosol ein bis zwei Jahre benötigen. So würden die Temperaturen, die durch stratosphärisches Aerosol gesenkt würden, binnen 8,3 Jahren auf das Niveau kommen, das sie ohne CE erreicht hätten. Bei weltraumbasiertem SRM würde dies 6,4 Jahre dauern. (Jones et al., 2013, S. 9749 - 9751)

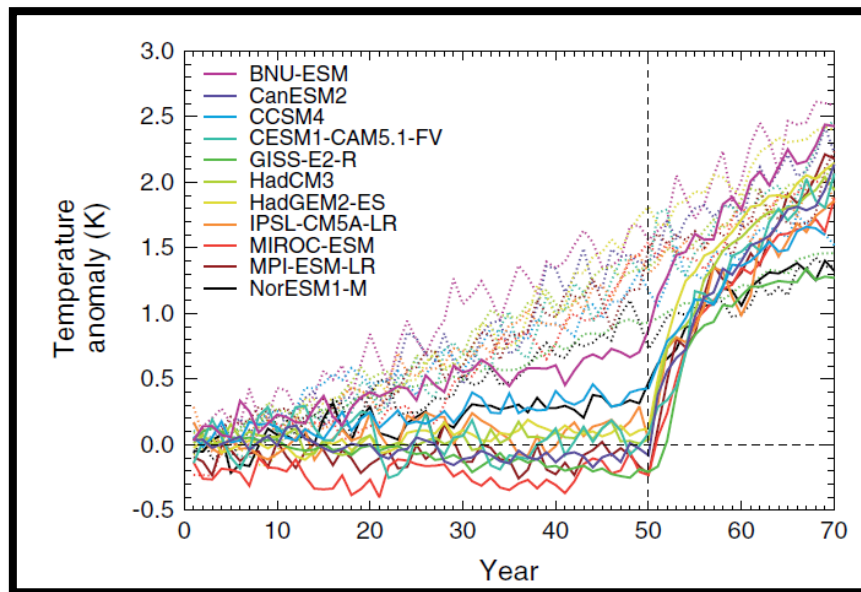


Abbildung 11: Entwicklung mittlerer globaler Durchschnittstemperatur bei Abschwächung der Solarkonstante (bei weltraumbasiertem SRM) mit abrupter Beendigung der SRM Maßnahme nach 50 Jahren und weitere Temperaturentwicklung. Durchgezogene Linien zeigen den Verlauf mit weltraumbasiertem SRM, gestrichelte Linien zeigen den Temperaturverlauf bei jährlichem Zuwachs in der CO₂-Konzentration um 1 %. (Quelle: Jones et al., 2013, S. 9744).

Der IPCC führt aus, dass, im Falle einer Beendigung von ausgeprägt eingesetzten SRM Maßnahmen die Steigerung der Temperaturen sich binnen einem oder zwei Jahrzehnten erhöhen würde (Pachauri et al., 2015, S. 89).

Einigkeit herrscht bei Jones et al. (2013, S. 9743 & 9745) im Wesentlichen darüber, dass bei einem abrupten Abbruch von SRM Maßnahmen der globale mittlere Niederschlag ansteigen sowie an verschiedenen Stellen das arktische Meereseis schmelzen würde. Wenig Konsens herrscht hingegen darüber, wie sich die veränderten Niederschlagsmuster weltweit verteilen würden.

3.5.3 Auswirkungen auf den menschlichen Organismus

Die Auswirkungen auf Lebewesen wurden im Allgemeinen und hinsichtlich des Fallouts in den Hintergrundpapieren und in einschlägigen Studien (Umweltbundesamt, 2011; Royal Society, 2009; SRMGI, 2012; Rickels et al., 2011) kaum benannt. Die Nebeneffekte, die sich auf den menschlichen Organismus beziehen, wurden in Publikationen zum SAI kaum beleuchtet (Effiong & Neitzel, 2016, S. 1).

Nowack et al. (2016, S. 4200) benennen die Luftverschmutzung von SAI, die sich durch die ausgebrachten Partikel ergeben würde und für die noch nicht klar ist, in welchem Ausmaß sie sich bei einem Langzeiteinsatz von SRM entfalten würde. Des Weiteren wird als mögliche Folge eine Zunahme der UV-B Strahlung benannt, die – durch einen Abbau von Ozon durch die ausgebrachten Aerosole – an die Erdoberfläche gelangen könnte. UV-B-Strahlung vermag menschliche DNA zu verändern und wird mit chronischen Krankheiten im Immunsystem und in der Haut sowie mit Hautkrebs in Verbindung gebracht (Nowack et al., 2016, S. 4192). Erwähnung findet zudem, dass durch den Zuwachs an diffuser Strahlung eine Einbuße im Vitamin-D-Haushalt von Menschen eintreten könnte.

Effiong & Neitzel (2016, S. 3) schildern, dass mit großer Sicherheit Menschen stofflich durch die ausgebrachten Partikel beeinträchtigt werden. Die Aufnahme der herunterrieselnden Partikel würde dabei hauptsächlich respiratorisch⁴², aber auch transdermal⁴³ oder durch die Verdauung verunreinigter Lebensmittel oder Wasser erfolgen.

Die SRMGI (2012, S. 19) beschreibt, dass die Nutzung von Sulfataerosolen den gleichen Effekt wie die Emission von Sulfaten durch die Verbrennung von fossilen Brennstoffen habe, lediglich ohne die negativen Effekte auf die menschliche Respiration dieser Emissionen. Studien, die die Einatmung von Schwefelsäure behandelten, kamen allerdings zu dem Ergebnis, dass lokale Reizungen, jedoch keine systemische Wirkung auf den Körper, folgte. Husten, Hautreizungen, Rötungen der Luftröhre und der Bronchien sind festgestellte Folgen geringer Mengen eingeatmeter Schwefelsäure. Auf ein Ausgesetztsein von höheren Dosen kann der Tod folgen. (Effiong & Neitzel, 2016, S. 4)

Neben den Auswirkungen der Sulfataerosole auf den menschlichen Organismus habe Bariumtitanat Auswirkungen auf den Stoffwechsel, die Atmung, das Herz-Kreislauf-System, den Magen-Darm-Trakt und einen neurologischen Effekt (Effiong & Neitzel, 2016, S. 5).

Abeggeln et al. (2016, S. 182) benennen gesundheitliche Beeinträchtigungen, wie z. B. Atemwegserkrankungen, die mit durch Flugzeuge entstandenen, Emissionen⁴⁴ einhergehen. Partikel solcher Emissionen können wesentlich kleiner werden als 100 nm und bedürfen zur Detektion einer Analyse ultrafeiner Partikel. Das Umweltbundesamt (2016c) zählt „Schleimhautreizungen und lokalen [sic!] Entzündungen in der Luftröhre und den Bronchien oder den Lungenalveolen bis zu verstärkter Plaquebildung in den Blutgefäßen [...]“ zu einigen der

⁴² Die Respiration [lat.] ist die Atmung (Der Brockhaus, 2002, Band 11, Artikel Respiration).

⁴³ Aus dem lateinischen trans = hinüber, hindurch und dermal = die Haut betreffend. Z. B.: *Durch ein auf die Haut aufgeklebtes Pflaster, aus dem der Wirkstoff gleichmäßig freigesetzt wird, erfolgend.* (Duden, 1999, Band 9, Definition Transdermal; Der Brockhaus, 2002, Band 3, Artikel Derma).

⁴⁴ Flugzeuge im internationalen Passagierflugverkehr emittieren typischerweise Methan, Kohlenstoffmonoxid und -dioxid, sowie Distickstoffmonoxid, flüchtige organische Verbindungen und Schwefeldioxid (Ittershagen, 2016).

Auswirkungen von Partikeln mit einer Größe von $< 2,5 \mu\text{m}$. Aluminium⁴⁵ kann „bei Überdosierung zu schädlichen Wirkungen auf das Nervensystem, die Fortpflanzung und die Knochenentwicklung führen [...]“ (Umweltbundesamt, 2016b) und hat in Nanometergröße toxische Auswirkungen auf die Lunge.

Wagner et al. (2001, S. 10) fanden in einer achtjährigen Studie heraus, dass Aluminiumoxid in Nanometergröße eine erhebliche Toxizität aufweist und die Immunabwehr (Phagozytose⁴⁶) abschwächen kann. Darüber hinaus weisen die Autoren darauf hin, dass Nanopartikel abträgliche Auswirkungen auf die Lungen haben und in tiefes Gewebe eindringen können.

Blaylock (2012, S. 3 - 5) führt aus, dass bereits kleine Mengen Aluminium, wie sie zum Teil auch im Trinkwasser vorliegen können, zu Entzündungen des Gehirns führen können. Dies wurde in Tierversuchen bewiesen. Besonders in Verbindung mit anderen Metallen könne dieser neurotoxikologische Vorgang noch verstärkt werden. Aluminium in Nanopartikelgröße wird hierbei besonders bezüglich seiner Bedenklichkeit hervorgehoben. Jigyasu et al. (2014, S. 437) sehen Aluminium als potenziellen Giftstoff, der mit der Alzheimer-Krankheit in Verbindung gebracht wird.

Robock (2008, S. 16) erwähnt, dass die weiße Einfärbung des Himmels bei der Einbringung von Aerosolen starke psychologische Auswirkungen auf den Menschen haben könnte und dass mehr saure Partikel in der Troposphäre einen Effekt auf die menschliche Gesundheit haben würde.

3.6 Argumente zum Für und Wider der Forschung und Einsatzbereitschaft

Einige der bisher gesammelten Fakten ermöglichen es, den Ansatz SRM zu erforschen und anzuwenden, zunächst – grundlegend – zu evaluieren. Dafür werden in diesem Kapitel die Stakeholder und einige der technischen Gegebenheiten, die in den vorangegangenen Unterkapiteln beleuchtet wurden, für eine mögliche Bewertung herangezogen.

Vor dem Hintergrund der Chancen und Risiken, die sich für den Planeten ergeben könnten, kann ein objektives Argumentieren zielführend sein. Für die Entscheidung, ob SRM eingesetzt werden soll oder nicht, werden mitunter die folgenden Argumente ausschlaggebend sein, die an dieser Stelle jedoch ohne Wertung anzusehen sind. Vielmehr dienen sie dazu,

⁴⁵ Gemeint sind Aluminium(III)-Ionen – über Aluminiumoxidpartikel in Nanogröße bestehen hinsichtlich der Effekte auf den Menschen Unsicherheiten (Umweltbundesamt, 2016b). Effiong & Neitzel (2016, S. 5) schildern dagegen, dass hinsichtlich der Toxizität zwischen Aluminium und Aluminiumoxid kein Unterschied vermutet werde.

⁴⁶ Phagozytose ist die Aufnahme von Bakterien, Protozoen und Fremdkörpern oder eigenen Körperzerfallsprodukten in das Zellinnere durch Umfließen bei Einzellern (Amöben) und im Gewebe vielzelliger Lebewesen durch Fresszellen (Phagozyten, auch Wanderzellen gen., weil sie frei beweglich sind). Phagozyten, z. B. weiße Blutkörperchen, können die außerhalb der Zelle liegenden Fremdkörper in das Zellinnere aufnehmen und durch Enzyme abbauen. (Der Brockhaus, 2002, Band 11, Artikel Phagozytose)

die wichtigsten Haltungen und zu berücksichtigende Standpunkte zum SRM in die Debatte miteinfließen lassen.

Die Argumente sind technisch gehalten, um in den Charakter dieses Kapitels eingeordnet werden zu können und umreißen dabei grob die Ideen, die für oder gegen eine Erforschung und/oder einen Einsatz von SRM sprechen könnten. Unkenntnis über die tatsächlichen, konkreten Auswirkungen lassen es zu diesem Zeitpunkt widersinnig erscheinen, dahingehende Argumente zum Für oder Wider ins Feld zu führen. Zudem würde dies den Rahmen dieser Bachelorarbeit übersteigen. Die ethische Betrachtungsweise sowie die Evaluierung, inwieweit die Bevölkerung in Forschungs- oder Anwendungsvorhaben bezüglich des CE/SRM⁴⁷ einbezogen wurde, werden soll und kann, wird in Kapitel 4 behandelt.

3.6.1 Forschung

Das am meisten Erwähnung findende Argument, das gegen eine Erforschung von CE Maßnahmen im Allgemeinen angeführt wird, ist, dass durch die Verwendung einer Technologie wie SRM, die die globale bodennahe Durchschnittstemperatur zu senken vermag, Bestrebungen zur Reduktion von Treibhausgasemissionen unterminieren würde. Die Konsequenz dieses als *moral hazard* bezeichneten Argumentes könnte sein, dass Ressourcen, die für die Mitigation von Treibhausgasen aufgewendet würden, durch das Aufbrauchen für Geoengineeringmaßnahmen nicht mehr zur Verfügung stehen (Rickels et al., 2011, S. 27). Keith et al. (2010, S. 426) führen dagegen aus, dass die Bestrebungen zur Erforschung von SRM mit den Bestrebungen einhergehen sollen, Emissionsreduktions- und Anpassungsmaßnahmen weiterhin zu fördern, sodass beide Bemühungen miteinander koexistieren könnten.

Die Gefahr, dass die Erforschung der Technologie eine Erprobung unmittelbar nach sich zöge, deutet Jamieson (1996, S. 333) heraus. Er beschreibt, dass Technologien, die erforscht werden, danach suchen, sich selbst in Einsatz zu bringen, um somit den Fortschritt der Forschung zu sichern. Das Risiko bestehe, dass mögliche ethische und soziale Konflikte erst ans Licht kommen, wenn man bereits an der Idee der Umsetzung einer Technologie festhalte, meist wenn es bereits zu spät sei, dieses „Eigenleben“ aufzuhalten (Jamieson, 1996, S. 333).

Wie in Kapitel 3.1 beschrieben, sind auch nicht-staatliche Akteure an den bisherigen Forschungsbestrebungen beteiligt. Dass die Forschung von finanzstarken Akteuren abhängen könnte, ist ein wesentlicher Punkt. Die Absicht der Forschungsvorhaben könnte somit von der zugrundeliegenden Idee der SRM Erforschung abweichen und andere Interessen in den Vordergrund rücken lassen. Auch die Gefahr, dass Technologien zur Wettermodifikation zu militärischen Zwecken verwendet werden, könnte eintreten (Robock, 2008, S. 17).

⁴⁷ Einige der angeführten Argumente beziehen sich zum einen auf das Climate Engineering im Allgemeinen. Zum anderen werden, der Tragweite des SRM geschuldet, spezifische Argumente dahingehend angeführt.

Neben der Frage, ob und wie mit der Forschung begonnen werden soll, ist die Frage zu behandeln, wann die Erforschung voranschreiten sollte. Für die zeitliche Abfolge erachtet Keith (2002, S. 365), dass „derartige Fähigkeiten [...] automatisch durch die weitere Entwicklung von Wissenschaft und Technik entstehen.“ Befürworter der Forschung argumentieren, dass für einen Krisenfall die Technologie bereits verfügbar sein sollte (Keith et al., 2010, S. 426), wogegen die Sichtweise stehen könnte, dass für eine Technologie zur Abkühlung des Planeten keine ausdrückliche Notwendigkeit bestehe (Rickels et al., 2011, S. 85 – 86).

3.6.2 Einsatzbereitschaft

In Verbindung mit der Frage, wie zügig die Forschung voranschreiten sollte, steht der Gedanke, dass zukünftig möglicherweise ein Kipppunkt erreicht werden könnte, der einen Einsatz von CE Maßnahmen als plausible Option erscheinen lässt (Rickels et al., 2011, S. 30).

Da in diesem Falle die Möglichkeiten von SRM lediglich die Symptome des Klimawandels beheben würden, ist die Effizienz eines Einsatzes abzuschätzen, denn die Technologie richtet sich nicht an die Versauerung der Ozeane oder die Reduzierung von Treibhausgasen. Die Zweckmäßigkeit der Maßnahme ist demzufolge ehrlicherweise zu erörtern und abzuschätzen, ab wann Mitigation und Adaption nicht mehr hinreichend effektiv sind, um formulierte Klimaziele zu erreichen (Rickels et al., 2011, S. 31 - 32).

Um in einem solchen Notfall entsprechende Maßnahmen ergreifen zu können, könnten demnach fundierte, bereits erforschte Ansätze nutzbringend sein, um unmittelbar in Aktion treten zu können. Dieser Ansatz zielt im Besonderen auf die Situation ab, dass Mitigation und Adaption insoweit gescheitert sind, als dass eine Maßnahme wie SRM den einzigen Ausweg darstellt, der katastrophale Folgen abzuwenden vermag (Rickels et al., 2011, S. 30). In Großbritannien und den USA gebe es dennoch bereits die Tendenz, solche Technologien einzusetzen (Umweltbundesamt, 2011a, S. 2 – 3).

Schnittstelle zwischen Forschung und Einsatzbereitschaft sind Feldversuche, die einen großen Erkenntnisgewinn für die Wissenschaft bedeuten würden (Robock et al., 2010, S. 531). Ott (2010, S. 41) beschreibt, dass es sich bei der Dimension eines solchen Feldversuchs bereits um einen Einsatz handeln würde.

Da bei der Verteilung z. B. der Niederschläge große Unsicherheiten bestehen (Jones et al., 2013, S. 9743), kann eine gerechte Verteilung von Schäden und Nutzen nicht gewährleistet werden (Rickels et al., 2011, S. 33). Auch finanzielle Interessen könnten unausgeglichene Interessenansprüche hinsichtlich der Einsatzbereitschaft, ähnlich wie bei der Forschung, fördern (Planungsamt der Bundeswehr, 2012, S. 9).

Grunwald (2010, S. 37) sieht in den Ansätzen, CE/SRM als Behebung menschenverursachter Probleme zu nutzen, das eigentliche Problem. Seiner Ansicht nach impliziert die technologische Kompensation zur Bewältigung eines durch eine andere Technologie verursachten Problems noch weitreichendere Folgen, weil auch diejenige Technologie, die helfen soll,

unvorhersehbare Risiken und Nebenwirkungen beinhaltet. Renn et al. (2011, S. 11) führen ähnliche Gedanken an.

Gegner von Wettermodifikation wie die ETC Group legen die Forderung zugrunde, dass zur Sicherung aller lebenden und schützenswerten Ökosysteme, einschließlich der Menschen – bis eine ausführliche Debatte stattgefunden hat – ein Moratorium⁴⁸ auf alle CE Maßnahmen verhängt wird (ETC Group, 2010b, S. 40).

Abschließend zur Einsatzbereitschaft muss die Frage geklärt werden, ob und wie eine Strategie aussieht, die eine Beendigung von SRM Maßnahmen regelt. Die Royal Society (2009, S. 7) erachtet die Rückführung in den ursprünglichen Zustand binnen ein oder zwei Dekaden nach Einsatz von CE Maßnahmen als möglich, wohingegen Jones et al. (2013, S. 9751) bei Abbruch von SAI eine stete Steigerung der bodennahen Durchschnittstemperatur prognostizieren.

⁴⁸ Das Moratorium ist ein durch Vertrag oder Staatsakt gewährter Zahlungsaufschub für fällige private oder staatliche in- oder ausländische Verbindlichkeiten (Der Brockhaus, 2002, Band 9, Artikel Moratorium). Im Zusammenhang mit CE wird ein Moratorium allerdings als eine Anwendungsrestriktion definiert, die die Beteiligten der Konvention, in dem das Moratorium ausgesprochen wurde, zur Unterlassung bewegt.

4 Betrachtungsschwerpunkte des Solar Radiation Management

Die hauptsächlich technologiebezogenen Argumente aus Kapitel 3.6 können die Vielschichtigkeit des SRM nur zum Teil erfassen. Neben den Konsequenzen, die sich aus der Technologie selbst ergeben, gilt es noch andere Betrachtungsschwerpunkte einzuschätzen, die erforderlich sind, um das Thema SRM bewertbar zu machen.

Dahingehend wird zunächst der Kenntnisstand, der zum SRM herrscht, erfasst. Anschließend werden Maßnahmen zur Beeinflussung des Strahlungshaushaltes aus verschiedenen ethischen Blickwinkeln beleuchtet. Der rechtliche Rahmen, der CE hinsichtlich SAI ermöglicht oder dem entgegensteht wird im darauffolgenden Unterkapitel erörtert. Dieses Kapitel wird mit den ökonomischen Faktoren, die das SAI letztendlich auch quantitativ erfassen, abschließen.

4.1 Gesellschaftliche Wahrnehmung

4.1.1 Wissensstand

Allgemein gesprochen ist das Climate Engineering in der Wahrnehmung deutscher Bürger noch nicht angekommen. Dies hänge vor allem damit zusammen, dass die Berichterstattung diesbezüglich schwach ausgeprägt sei (Renn et al., 2011, S. 29), obwohl die Anzahl der Publikationen zum Thema Geoengineering in Printmedien, Internetartikeln und –beiträgen sowie in der Wissenschaft zwischen den Jahren 2000 und 2010 anstieg (s. Abbildung 12).

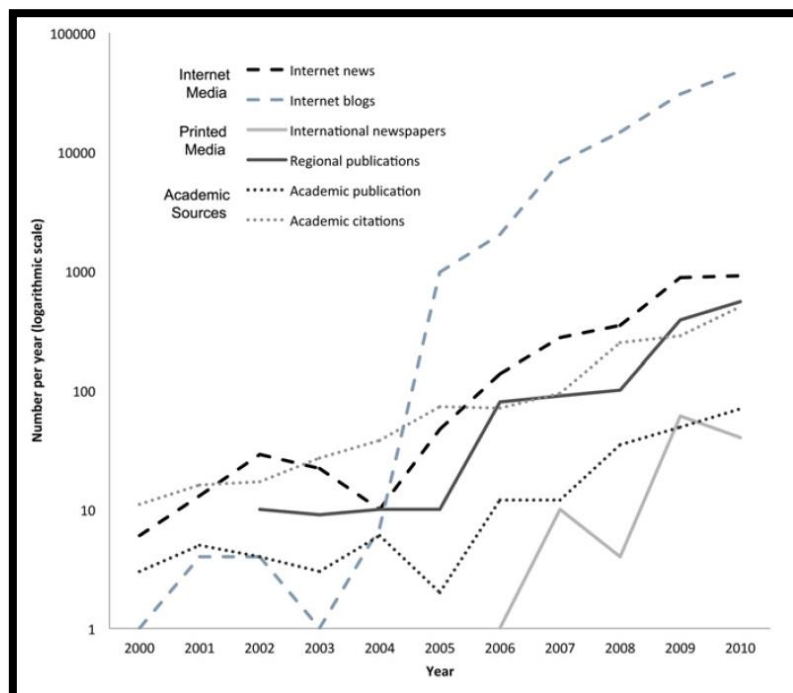


Abbildung 12: Zunahme an Publikationen in Form von Print- und Internetmedien, sowie akademischen Beiträgen bzgl. Geoengineering in den Jahren von 2000 bis 2010. (Quelle: Mercer et al., 2011, S. 2).

Etwas mehr Resonanz zum Climate Engineering als in Deutschland gibt es in Großbritannien und in den USA (Renn et al., 2011, S. 50) sowie in Kanada und Australien, denen, weit abgeschlagen, asiatische Länder wie Südkorea und China folgen (Rickels et al., 2011, S. 80 – 81). 74 % der Befragten einer in den USA durchgeführten Umfrage zum CE wussten nicht, worum es beim CE geht. Dem entgegen standen 3 %, die Kenntnis davon besaßen (Renn et al., 2011, S. 29).

Mercer et al. (2011, S. 4) beziffern den Anteil derjenigen, die Geoengineering in einer Befragung von 3105 Amerikanern, Kanadiern und Briten richtig schildern können, mit 8 %. Ein gering vorhandenes Bewusstsein über das SRM existiert demnach in den USA, Kanada und Großbritannien (Mercer et al., 2011, S. 9).

Obwohl die Wahrnehmung von CE noch gering ist, gibt es neben wenigen, die sich für CE aussprechen, bereits eingetragene Organisationen gegen CE (Renn et al., 2011, S. 50). Obwohl Einigkeit darüber besteht, dass die Bevölkerung in einem frühen Stadium der Entwicklung über neue Technologien aufgeklärt werden soll (Renn et al., 2011, S. 7), um den gesellschaftlichen nicht vom wissenschaftlichen Prozess zu entkoppeln, gibt es bisher noch keine öffentliche Diskussion darüber. Renn et al. (2011, S. 24) beschreiben, dass im Gegensatz zu bisherigen Risikotechnologien wie zum Beispiel bei der Gentechnik, in Publikationen auch Bürger zur Sprache gekommen seien. Im Falle des CE sei dies nicht der Fall gewesen.

Die Thematisierung von CE auf der Convention on Biological Diversity (CBD) im Jahre 2010 zeuge davon, dass von politischer Seite ein erhöhtes Augenmerk auf CE Maßnahmen gerichtet wird (Rickels et al., 2011, S. 125). Die Aufmerksamkeit in der politischen sowie der gesellschaftlichen Landschaft dürfte sich durch die, von CIA-Direktor John O. Brennan (2016) gehaltene Rede zu transnationalen Sicherheitsgefährdungen – in der er SAI erwähnt – vor dem Council On Foreign Relations noch weiter erhöhen.

4.1.2 Öffentliche Meinungstendenz zu SRM

Macnaghten & Szerszynski (2013, S. 469) fanden in einer Studie heraus, dass fast alle Teilnehmer der Studie kein Vertrauen in die Fähigkeit der Forschung darüber haben, mögliche Nebeneffekte und negative Auswirkungen im Vorfeld zu identifizieren.

Darüber hinaus äußerten die meisten Teilnehmer das Bedenken, dass die Technologie anders genutzt würde, als zu dem Zwecke der Klimaerwärmung entgegenzuwirken und die Nutzung der Technologie mit der Intention, eigene Interessen zu verfolgen, Folgen hervorrufen könnte, die nicht mit den Intentionen von CE übereinstimmen. Die Meinungen der Befragten dieser Studie decken sich größtenteils mit denen anderweitig verfügbarer Literatur, die die Wahrnehmung der Bürger zum SRM thematisiert. (Macnaghten & Szerszynski, 2013, S. 471)

Das Resultat einer Telefonumfrage mit 1000 Briten im Rahmen der Studie der Royal Society (2009, S. 43) war, dass 47 % der Befragten die Einbringung von Aerosolen in die Stratosphäre ablehnen. Borick & Rabe (2012, S. 4) zeigen in einer 887 Teilnehmer umfassenden

Telefonumfrage amerikanischer Bürger, dass 69 % der Befragten der Meinung sind, dass SRM mehr Schaden anrichte, als dass es Nutzen bringen würde.

Renn et al. (2011, S. 51) beziffern das Verhältnis von positiven zu negativen Kommentaren in Onlinemedien und Leserbriefen mit eins zu 20.

Dem gegenüber stehen Ergebnisse von Mercer et al. (2011, S. 5 – 6), in denen Teilnehmer in deutlicherem Maße Befürwortung für SRM ausdrücken, wenn Nebenwirkungen der Technologie ausgeschlossen werden könnten. In Deutschland ist mit geringer Akzeptanz zum CE im Allgemeinen, entsprechend der hohen Unsicherheiten im Besonderen zum SAI, zu rechnen (Rickels et al., 2011, S. 91). Umweltkonflikte zeichnen sich zudem durch Widersprüche zwischen Gutachtern und Wissenschaftlern aus, wodurch der Bevölkerung Vertrauen in die Wissenschaft verloren ginge (Renn et al., 2011, S. 10). Konkret äußert sich dies an zunehmend kritischer Bewertung von Technologien in Europa (Planungsamt der Bundeswehr, 2012, S. 8).

Die Öffentlichkeit wird aller Voraussicht nach Zweifel darüber haben, ob die Ausbringung von Aerosolen nicht im Widerspruch mit den Bestrebungen der vergangenen Jahrzehnte zur Reduzierung von Luft- und Wasserverschmutzung steht (Royal Society, 2009, S. 42). Es wird für die deutsche Öffentlichkeit eine geringe Akzeptanz von CE Maßnahmen erwartet (Renn et al., 2011, S. 30).

Im Zusammenhang mit der öffentlichen Wahrnehmung zum SRM ist erwähnenswert, dass 2,6 % der befragten Amerikaner, Kanadier und Briten überzeugt davon sind, dass Chemikalien bereits in die Atmosphäre eingebracht werden – dies wird in der Studie als „Chemtrails“⁴⁹ bezeichnet. Weitere 14 % der Befragten sind der Ansicht, dass derartige Programme wenigstens teilweise durchgeführt werden (Mercer et al., 2011, S. 8).

Cairns (2014, S. 27) sieht in der Betrachtung der „Chemtrail“ Theorie wichtige Aspekte, die für die politische Betrachtung des aufkommenden CE von erheblicher Bedeutung sein könnten.

4.1.3 Ansätze zur Einflussnahme der öffentlichen Wahrnehmung

Um Vertrauen und Glaubwürdigkeit in die Debatte um CE zu bringen, ist eine frühe Einbindung der Bürger unabdingbar (Renn et al., 2011, S. 7). Da der Punkt, an dem sich die öffentliche Meinung zu einer neuen Technologie bildet, noch nicht eingetreten ist, könne die Chance zur Aufklärung der Bürger zu Beginn der CE Debatte genutzt werden (Renn et al., 2011, S. 49; Mercer et al., 2011, S. 8).

⁴⁹ Chemtrails sind ein mit dem Geoengineering in Verbindung gebrachtes Phänomen, das die von einem Flugzeug hinterlassenen persistenten Kondensstreifen meint. Behauptet wird diesbezüglich, dass „[...]im Rahmen geheimer Projekte der USA militärische und zivile Flugzeuge Aluminium und Bariumverbindungen in die Atmosphäre ausstoßen, aus denen sich diese Chemtrails – ähnlich der Bildung von Kondensstreifen – entwickeln würden“ (Umweltbundesamt, 2011b, S. 1).

Renn et al. (S. 46; 49; 55) nennen eine mögliche Strategie, die hilfreich sein kann, die Informierung der Öffentlichkeit zu erreichen. Ziel eines solchen Vorgehens könne jedoch nicht die Konsensfindung sein. Vielmehr soll ein kritisches Abwägen und die Informierung der Öffentlichkeit ermöglicht werden (Renn et al., 2011, S. 54).

Beteiligungsverfahren würden zunächst der Zugänglichkeit aller nötigen Informationen in Form von Bürgerversammlungen, Internetauftritten oder in öffentlichen Einrichtungen, wie Volkshochschulen o.ä. dienen. Die Befragten amerikanischer, kanadischer und britischer Herkunft äußerten, dass sie Wissenschaftler an Universitäten bei der Bereitstellung von Informationen am vertrauenswürdigsten ansehen, gefolgt von Umweltorganisationen (Mercer et al., 2011, S. 6); als weniger vertrauenswürdige Informationsquellen werden Unternehmen, die Medien und Firmen, die vom SRM profitieren würden, genannt. Auffallend sei zudem das fehlende Vertrauen in die jeweiligen Regierungen als Bezugsquelle für Informationen (Mercer et al., 2011, S. 8).

Darauf würde die Einbindung weiterer Stakeholder aus Wissenschaft, Politik und Wirtschaft zur Feststellung der Interessensansprüche folgen, die eine Analyse und Bewertung der Vorschläge für oder gegen das CE anführen würde und Grundlage von darauf folgenden Bürgerkonferenzen sein kann, an denen auch nicht organisierte Bürger teilnehmen, um zu der Debatte beizutragen (Rickels et al., 2011, S. 93).

Abschließen könnte der Meinungsfindungsprozess mit einem plebiszitären Element, das jedoch nur dann sinnvoll erscheint, wenn Elemente der Bürgerbeteiligung mit einer Wissensgrundlage ausgestattet sind (Rickels et al., 2011, S. 89).

4.2 Ethische Betrachtungsweise

Neben den technischen Pros und Kontras gibt es auch moralische oder ethische (hauptsächlich) Einwände, die sich an CE richten. Die Argumente beziehen sich zwar auf das CE im Allgemeinen, sind also auch auf das Carbon Dioxide Removal (CDR) zutreffend, jedoch genauso konkret auf den Fall von Stratosphärischen Aerosol Injektionen (SAI), besonders im Zuge des globalen Ausmaßes von SRM Maßnahmen gültig.

Genau wie in Kapitel 3.6 wird hier keine Stellung zu den Argumenten bezogen. Vielmehr werden Konsequenzen in Szenarien skizziert, die eintreten könnten, wenn ein bestimmter Umstand vorliegt.

4.2.1 **Natur-, Religions- und existentialistische Ethik**

Wenn sich durch SRM eine schlimme Klimakatastrophe abwenden ließe und dies im Vorfeld so kommuniziert wird (zum Beispiel von Befürwortern der Forschung und Erprobung), könne dies für eine laxer Haltung bei der Reduzierung von CO₂-Emissionen führen. Vertiefend lässt sich sagen, dass der *Quick Fix*, der sich durch SRM erreichen ließe, zu keinerlei tiefgreifenden Veränderungen in menschlichen Verhaltensweisen führen würde (Rickels et al., 2011, S. 29). Das Bewusstsein für die Lage der Situation würde somit nicht gestärkt, sondern weiterhin durch Ignoranz bestimmt sein. Jamieson (1996, S. 331) argumentiert dazu, dass es leich-

ter sei, menschliche Verhaltensweisen zu verändern, als die Auswirkungen einer Technologie rückwirkend zu verändern.

Jamieson (1996, S. 331) führt auch den Punkt an, dass Probleme in der Umwelt daher kommen, dass versucht wurde, die Umwelt an den Menschen anzupassen, anstatt sich als Mensch der Natur anzupassen. Darüber hinaus könne die Ausbringung von Aerosolen als Verschmutzung angesehen werden und zeuge somit von mangelndem Respekt gegenüber der Umwelt, auch dann, wenn dadurch einem bereits eingetretenen Schaden entgegengewirkt werden kann (Rickels et al., 2011, S. 36).

Das Umweltbundesamt (2011a, S. 3) ergänzt die ethische Debatte um die Tatsache, dass nach dem Verständnis vieler europäischer Länder mit dem Denken, die Umwelt kontrollieren zu können, Vermessenheit und Selbstüberschätzung einhergeht. Inwieweit dieses Argument in technikorientierteren Gesellschaften und in der modernen Ethik Gültigkeit hat, ist unklar (Umweltbundesamt, 2011a, S. 3; Ott, 2010, S. 42).

Ein Konfliktpotenzial könnte sich außerdem mit den Kirchen auftun, wenn es sich, wie beim SRM, um gezielte Interventionen in natürlichen Systemen handelt (Rickels et al., 2011, S. 88).

4.2.2 Zukunftsethik (Transfer von Missständen und Risiken)

Die Eingriffe in die Natur könnten aufgrund ihrer irreversiblen Eigenschaft kommenden Generationen Chancen verwehren, die sie ohne den Einsatz der Maßnahme gehabt hätten (Jamieson, 1996, S. 330). Die Unwiederbringlichkeit eines natürlichen Zustandes kann auch gegen diese These verwendet werden, wenn beachtet wird, dass Mitigationsmaßnahmen ebenfalls irreversible Auswirkungen haben (Rickels et al., 2011, S. 32).

Eine weitere Auswirkung auf künftige Generationen sieht Ott (2010, S. 41) im Transfer von Risiken, der sich aus einer vernachlässigten Mitigationsanstrengung heraus ergeben könnte. Für den Fall gescheiterter Bemühungen, Missstände intergenerationell weiterzugeben, reiche eine technologische Möglichkeit als Wiedergutmachung als Kompensation anzubieten womöglich nicht aus (Rickels et al., 2011, S. 29).

Im Zuge dieser Risiken sollen Zwangslagen (wie die Entscheidung darüber, ob und wie das SRM beendet werden soll) für kommende Generationen vermieden werden (Rickels et al., 2011, S. 36). Vor dem Hintergrund, dass das Klima nicht angemessen verstanden werden kann und der Mensch als Steuerelement dieser Technologie versagt, benennt die ETC Group die Unprognostizierbarkeit, die mit CE Technologie einhergehen könnte (Bronson et al., 2009, S. 34). Auch Jamieson (1996, S. 327) erwähnt den Fakt, dass die Überschätzung der Wissenschaft sich selbst gegenüber zu einer Fehleinschätzung der Situation führen kann. Zudem könnte die Situation mit CE – zum Beispiel durch den abrupten Abbruch von SAI – schlimmer sein als ohne (vgl. Rickels et al., 2011, S. 32).

4.2.3 Gerechtigkeit und Fairness

Durch die regional unterschiedlich starken Auswirkungen von SRM, rückt die Frage in den Vordergrund, wie Nutzen und Nebenwirkungen verteilt werden.

Die Befürchtung wird angeführt, dass die Lebenssituation derjenigen Menschen, die schon jetzt unter den ärmsten Bedingungen leben, noch weiter verschlechtert wird (Bronson et al., 2009, S. 34). Weitere gerechtigkeitstheoretische Aspekte konnten aufgrund der fehlenden technischen Kenntnis über die unterschiedlich stark ausgeprägten Auswirkungen an verschiedenen Orten noch nicht deutlich formuliert werden (Betz & Cacean, 2011, S. 40 – 41).

Um eine faire Entscheidung über den Einsatz von CE zu gewährleisten, ist nach Jamieson (1996, S. 329) in einer passenden Weise die gesamte Weltbevölkerung einzubinden.

Vertiefend dazu ist zu sagen, dass diejenigen, hauptsächlich westlichen, Industrienationen den derzeitigen Klimawandel herbeigeführt haben, die am meisten von der Verbrennung fossiler Brennstoffe profitiert haben. Genau jene Nationen werden vermutlich auch wieder diejenigen sein, die über den Einsatz von CE entscheiden werden. (vgl. Jamieson, 1996, S. 329) Im Zuge dessen kann SRM als „[...] der Versuch westlicher Industrienationen, sich von der historischen Verantwortung für die globale Erwärmung ‚freizukaufen‘.“ (Wiertz & Reichwein, 2010, S. 20) angesehen werden. Hinzu kommt noch, dass das Engagement durch Staaten oder durch die Beteiligung von Unternehmen oder privater Investoren zu einer Unterwanderung der Adressierung des ursächlichen Problem es führen könne (Wiertz & Reichwein, 2010, S. 19 – 20).

Die Royal Society (2009, S. 40) deutet zudem heraus, dass bestehende ökonomische Ungleichheiten zwischen reichen und armen Regionen der Erde wahrscheinlich seien, da eine gerechte Verteilung der Vor- und Nachteile unwahrscheinlich zu realisieren sei. Unter anderem vor diesem Hintergrund müsste auch entschieden werden, wer die Technologie kontrollieren würde und welche Absichten damit verfolgt würden (Robock, 2008, S. 17).

4.3 Rechtlicher Rahmen & Politische Instrumente

Die vorgeschlagenen SRM Technologien bewirken erhebliche Eingriffe in die Ökosysteme der Erde⁵⁰ und bedürfen daher eines anwendbaren Rechtsrahmens.

Dafür werden im Folgenden möglicherweise rechtlich relevante Regelwerke, sowie eine nicht rechtsverbindliche Vereinbarung angeführt und auf ihre Anwendung auf das SRM hin untersucht, die sowohl umweltrechtlich von Belang sind als auch die territoriale Integrität von betroffenen Staaten zum Gegenstand haben.

⁵⁰ Hinsichtlich der negativen Konsequenzen, die sich auf die Umwelt durch den Einsatz ergeben könnten, wird SRM bezüglich seines Schadenspotenziales kritischer bewertet als die CE Technologien zum Carbon Dioxide Removal (CDR) (Rickels et al., 2011, S. 116; Proelß & Güssow, 2011, S. 68).

4.3.1 Relevante Regelwerke

Ein Verbot zur Anwendung von CE Maßnahmen existiert derzeit noch nicht (Zürn & Schäfer, 2011, S. 20). Darüber hinaus fehlen noch rechtliche Elemente, die auf Fragen zur Haftung bei entstandenen Folgeschäden von SRM Technologien anwendbar sind (Umweltbundesamt, 2011a, S. 36). Dies ist vor allem vor dem Hintergrund zu beantworten, dass mögliche Nebeneffekte von angewendeten Technologien extrem hohe Kosten verursachen würden (Zürn & Schäfer, 2011, S. 24).

Aufgrund der fehlenden, konkret auf CE anwendbaren Regelwerke⁵¹ gilt generell das Völker-gewohnheitsrecht. Die Ausgleichsmechanismen, die möglicherweise entstehende Konflikte beizulegen vermögen, sind Verbote der Maßnahmen oder Gebote zur Mitnutzung von Res-sourcen desjenigen Staates, der Schaden in einem Nachbarnstaat verursacht hat. Im Hin-blick auf CE sei jedoch rechtlich lediglich das Verbot ein Mittel zur Beilegung von Konflikten (Rickels et al., 2011, S. 110).

Das Verbot sei allerdings nur dann eine Option, wenn die Folgen der in Frage stehenden Maßnahme nachweislich von der eingesetzten Technologie herrühren oder ein Verstoß ge-gen das Präventionsprinzip⁵² vorliege. Dass das Präventionsprinzip verletzt werden könne, müsse wiederum durch, in Zusammenhang mit der Maßnahme stehenden, Belegen unter-mauert werden. (Rickels et al., 2011, S. 111)

Dem Umfang der Bachelorthesis Rechnung tragend, werden im Folgenden lediglich die Re-gelwerke angeführt, die das SAI berühren könnten – rechtliche Begebenheiten hinsichtlich der Haftung nach einem Einsatz werden nicht erläutert.

4.3.1.1 Wiener Konvention & Montrealer Protokoll

Die *Wiener Konvention* von 1985 verpflichtet die Staatengemeinschaft, Einwirkungen auf die Ozonschicht in ihrem respektiven Hoheitsbereich zu vermeiden, sodass keine Schädigungen der Umwelt und des Menschen eintreten (Umweltbundesamt, 2011a, S. 34).

Das *Montrealer Protokoll* von 1987 regelt überdies, welche Stoffe zu einem Abbau von Ozon beitragen und beinhaltet die Regelung, dass der Einsatz bestimmter Stoffe reduziert wird (Umweltbundesamt, 2011a, S. 36). Unterzeichnet wurde die Konvention und das Protokoll von 196 Staaten (Rickels et al., 2011, S. 101).

Sowohl Schwefel als auch Aluminium tauchen als Stoffe im Montrealer Protokoll nicht auf (Proelß & Güssow, 2011, S. 31); dennoch steht SAI womöglich der Wiener Konvention ent-

⁵¹ Es existiert keine allgemein anerkannte Definition von Climate Engineering. Die verschiedenen Vor-schläge zum CE müssen separat, auf das Völkerrecht angewendet, betrachtet werden (Rickels et al., 2011, S. 116).

⁵² Um dem Präventionsprinzip genüge zu tragen, müsse eine Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP) stattfinden, um die die Auswirkungen potenziell umweltbelastender Technologien und Maßnahmen zu untersuchen (Rickels et al., 2011, S. 111).

gegen, da im Zuge der Maßnahmen eine Beeinträchtigung der Ozonschicht auftreten kann (Umweltbundesamt, 2011a, S. 34; vgl. Kapitel 0).

4.3.1.2 CLRTAP

Das Übereinkommen *Convention on Long Range Transboundary Air Pollution* (CLRTAP) regelt, dass eine grenzüberschreitende Luftverschmutzung von Emissionen unterbunden werden müsse. Es wurde im Jahre 1979 verabschiedet und sieht für die Umsetzung dieser Vorgabe die Reduzierung von Stoffen vor, die sowohl Schwefelemissionen (Royal Society, 2009, S. 40; Wiertz & Reichwein, 2010, S. 22) als auch weitere Stoffe, die als Aerosole diskutiert werden, umfassen (Rickels et al., 2011, S. 100).

Es wurde von 53 Staaten ratifiziert, darunter ausschließlich europäische Länder sowie Kanada und die USA (Umweltbundesamt, 2011a, S. 34).

Die „Offenheit“ der Konvention würde es ermöglichen, die Ausbringung von Aerosolen in den Rahmen ihres Anwendungsbereiches zu inkludieren, allerdings müssen die für die Erprobung oder Verwendung gewählten Stoffe nachweislich eine negative Auswirkung auf die Umwelt haben, um von der Regelung erfasst werden zu können (Rickels et al., 2011, S. 100 & 101).

4.3.1.3 Internationales Klimaschutzrecht

Das von 192 Vertragsstaaten unterzeichnete internationale Klimaschutzrecht verpflichtet die Teilnehmer dazu, CO₂-Konzentrationen langfristig zu stabilisieren und zu diesem Zwecke Technologien zu entwickeln. Da SRM als symptomatische Kompensationsmaßnahme begriffen wird und keinen Einfluss auf Treibhausgaskonzentrationen hat, ist die Anwendbarkeit von SAI auf das Klimaschutzrecht unklar (Umweltbundesamt, 2011a, S. 32 - 33).

Darüber hinaus enthält das Völkerrecht noch keine gültige Definition über den Begriff *Climate Engineering*, da bisherige Verträge nicht mit der Absicht geschlossen wurden, Maßnahmen zur Klimamodifikation anzuwenden. Eine zwar nicht weltgemeinschaftlich, sondern unilaterale Tendenz der USA ließ Bestrebungen erkennen, Wettermodifikation rechtlich zu erfassen. So wurden zu diesem Sujet zwischen 1947 und 1953 sechs Gesetze erlassen (United States Congress (95th) - Committee on Commerce, Science and Transportation, 1978, S. 193).

Zunächst ist vom normativen Grundsatz und unter Berücksichtigung von Verboten und Geboten davon auszugehen, dass erlaubt sei, was nicht verboten ist (Rickels et al., 2011, S. 95). Ein Verbot für CE bestehe nicht (Zürn & Schäfer, 2011, S. 20), allerdings sei das Völkerrecht auf CE noch nicht eingestellt, was eine politische Entscheidungsfindung erst noch erforderlich mache (Zürn & Schäfer, 2011, S. 21).

Zuletzt gilt es festzuhalten, dass, sollten unerwartete Umweltschäden in Drittstaaten auftreten, dies eventuell exorbitante Folgekosten hervorrufen könnte (Zürn & Schäfer, 2011, S. 24).

Sollten Auswirkungen von SRM negative Auswirkungen besitzen, besteht die Möglichkeit, dass dies als eine gegen das internationale Klimaschutzrecht gerichtete Maßnahme ausgelegt wird (Umweltbundesamt, 2011, S. 33).

4.3.1.4 ENMOD

Das 1977 vereinbarte Umweltkriegsabkommen ENMOD regelte, dass das Wetter nicht zu Kriegszwecken verwendet werden dürfe (United Nations General Assembly, 1977) und wurde von 73 Staaten verabschiedet (ETC Group, 2010b, S. 41). Es regelt, dass Technologien zur Wettermodifikation nicht als Waffe verwendet werden dürfen.

Obwohl beim SRM in natürliche Systeme eingegriffen wird, was als „feindliche Nutzung“ gegenüber der Umwelt verstanden werden kann, kann es nicht direkt als feindliche Nutzung angesehen werden, auf die der Rahmen der ENMOD Konvention anwendbar ist. Da man CE Aktivitäten nicht direkt als militärisch genutzte Technologie versteht, trifft der Tatbestand der feindlichen Nutzung nicht vorbehaltlos zu; ENMOD bietet somit keinen Rahmen für eine völkerrechtliche Betrachtung von SRM. (Rickels et al., 2011, S. 96)

Desweiteren erörtert das Abkommen nicht, ob die in Frage stehenden Technologien zur friedlichen Nutzung mit internationalem Recht kompatibel sind (Rayner et al., 2013, S. 15). Eine dem Völkerrecht nicht Genüge tragende Bewertung wird auch aus diesem Gesichtspunkt deutlich.

4.3.1.5 Weltraumvertrag von 1967

Der Weltraumvertrag von 1967 richtet sich an die Einbringung von Reflektoren in den Weltraum und hat somit nichts mit dem SAI zu tun (Rickels et al., 2011, S. 100). Diskutierte Höhen der Ausbringung von Aerosolen im SAI bewegen sich im Größenbereich von Höhen, die nicht hoch genug sind, um dem Weltraum zugeordnet zu werden. Der Weltraum beginnt nach internationalem Weltraumrecht mindestens ab einer Höhe von 60 km und liegt somit jenseits der Höhen von maximal 30 km, die im Diskurs um SAI erwähnt werden (Proelß & Güssow, 2011, S. 24).

Keith (2010, S. 16428) beschreibt, dass photophoretische Kräfte die, von ihm vorgeschlagenen, Aluminiumoxid-Aerosole über die Stratosphäre hinaus⁵³ anheben könnten. Die veränderte Situation durch die erhöhte Lage von Aerosolen müsste auf eine doch geltende Anwendung auf den Weltraumvertrag hin geprüft werden.

4.3.1.6 Convention on Biological Diversity (CBD)

Die Convention on Biological Diversity (CBD) hat als Ergebnis gebracht, dass der Einsatz von Climate Engineering Maßnahmen durch private Akteure nicht befürwortet wird. Die Be-

⁵³ Die Stratosphäre erstreckt sich über der Troposphäre bis in eine Höhe von ca. 50 km (Malberg, 2007, S. 21).

schlüsse dieser Konvention haben jedoch keine Rechtsverbindlichkeit. (Zürn & Schäfer, 2011, S. 19)

Innerhalb dieser Konvention wurde ein Anwendungsmoratorium auf Maßnahmen, die Auswirkungen auf die Biodiversität, sowie soziale, kulturelle und wirtschaftliche Aspekte haben könnten, verhängt (Umweltbundesamt, 2011a, S. 33). Hierfür wurde im Rahmen der CBD eine Begriffsdefinition für CE eingeführt, die jedoch nicht rechtsbindend ist. Der definierte Begriff ist demnach nur für den Umgang innerhalb der CBD gültig. (Rickels et al., 2011, S. 95)

4.3.2 Governance

Der Einsatz von CE im Allgemeinen, besonders aber im SRM, bedarf aufgrund seiner grenzübergreifenden Auswirkungen eines stabilen internationalen Rahmens. Ob dieser soziopolitische Rahmen, der für einen sicheren und effizienten Einsatz gebraucht wird, gewährleistet werden kann, sei nicht vorauszusagen (Rickels et al., 2011, S. 33).

In diesem Unter-Unterkapitel werden die Ansätze zu einer internationalen Koordinierung und Regulierung vorgestellt und Herausforderungen sowie mögliche geopolitische Konsequenzen skizziert.

4.3.2.1 Rechtliche Lage

SAI sei im Zusammenhang mit dem CLRTAP Abkommen und der Wiener Konvention zu bewerten (Rickels et al., 2011, S. 102). Die rechtlichen Grenzen sind allerdings dahingehend erkennbar, als dass die Regelwerke, die das SAI betreffen, nur angewandt werden können, wenn ein direkter Zusammenhang zwischen Emission und Immission nachweisbar ist. Die Erfassung großer Stoffmengen sei dahingehend, im Gegensatz zur Detektion von komplexen Klimavorgängen, auf ihren Ursprung hin realisierbar (Wiertz & Reichwein, 2010, S. 23).

Der Gedanke, den UN-Sicherheitsrat für die Entwicklung eines Rechtsrahmens für CE heranzuziehen entfalle derzeit, da für sein Eingreifen ein Umstand vorliegen müsse, der die Bedrohung des Weltfriedens betreffe. Ob CE durch z. B. die mögliche Erzeugung von Dürren oder Menschenrechtsverletzungen den Tatbestand der Verletzung des Friedens berühre, sei derzeit nicht geklärt (Rickels et al., 2011, S. 112). Für die Entwicklung eines auf CE anwendbaren Rechtsrahmens seitens der Vereinten Nationen gebe es derzeit keine Anzeichen (Rickels et al., 2011, S. 113).

Für die Debatte um die Zulässigkeit der Erforschung und des Einsatzes von SRM sehen Rickels et al. (2011, S. 112) auf Grundlage der bisherigen Entwicklungen die Foren UNFCCC⁵⁴ und CBD als diejenigen, in denen der weitere Diskurs stattfinden wird.

⁵⁴ UNFCCC ist die Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen. Sie hat hauptsächlich informationelle Aufgaben und wird durch das Kyoto-Protokoll, das Vorgaben der Vertragsstaaten zur Minderung von Treibhausgasen formuliert, hinreichend konkretisiert. (Rickels et al., 2011, S. 97)

4.3.2.2 Ansatz für eine mögliche Governance

Rickels et al. (2011, S. 119) beschreiben, dass gesellschaftliche sowie politische Konfliktpotenziale von internationalem Ausmaß, wie es bei einem CE Einsatz der Fall wäre, internationaler Kooperation bedürfen.

Im Allgemeinen wird in der Literatur eine Governance unter der Ägide der Vereinten Nationen favorisiert. Vorschläge dafür, neue Institutionen zur Reglementierung und Koordinierung von CE zu schaffen, gebe es kaum (Rickels et al., 2011, S. 129).

Einer vergleichbaren Ansicht, für die internationale Koordinierung und Kontrolle von CE eine Erweiterung bisheriger Regelungen vorzunehmen anstatt mit neuen rechtlichen Instrumenten abzudecken, ist die Royal Society (Rayner et al., 2013, S. 14).

Dem im Folgenden beschriebenen Ansatz einer möglichen Governance kann visuell in Abbildung 13 gefolgt werden. Ein Ansatz der Regulierung und Koordinierung von CE wird im Rahmen des internationalen Klimaschutzrechtes gesehen. So solle eine eigene CE-Agentur in die UNFCCC implementiert werden. Konkrete Aufgaben einer solchen Agentur könnten sein, die Forschungsfinanzierung zu koordinieren und durchzuführen sowie Wissen zusammen- und weiterzutragen. Die Vorgehensweise solle dabei transparent sein. (Rickels et al., 2011, S. 130)

Eine Implementierung in die UNFCCC könne zudem sinnvoll erscheinen, da so die Leitlinien zur Emissionsreduktion und die Leitlinien zum CE nicht getrennt voneinander betrachtet würden (Zürn & Schäfer, 2011, S. 37).

Die Bewertung der Forschungsergebnisse würde daraufhin von einem Kontrollgremium übernommen werden, das Kompetenzen in Beratung und Koordinierung aufweist. Unabhängigkeit sei durch die Einbettung dieses Kontrollgremiums in höherem Maße gegeben und eine große Anzahl an Akteuren aus verschiedenen Ländern könne die soziale Akzeptanz des gesamten Governance-Prozesses zusätzlich steigern. Eine weitere Aufgabe des Kontrollgremiums könnte die Prüfung von Alternativen zu CE sein. (Rickels et al., 2011, S. 130)

Nach erfolgter Bewertung der Forschungsergebnisse würden die Mitgliedsstaaten der UNFCCC letztendlich darüber entscheiden, ob Technologien entwickelt und Feldversuche durchgeführt werden. Diese Entscheidungen würden unter der Beachtung des Vorsorgeprinzips getroffen werden und gäben u.a. vor, welche Bedingungen für einen Einsatz bestimmter Technologien gelten müssten. (Rickels et al., 2011, S. 130 – 131)

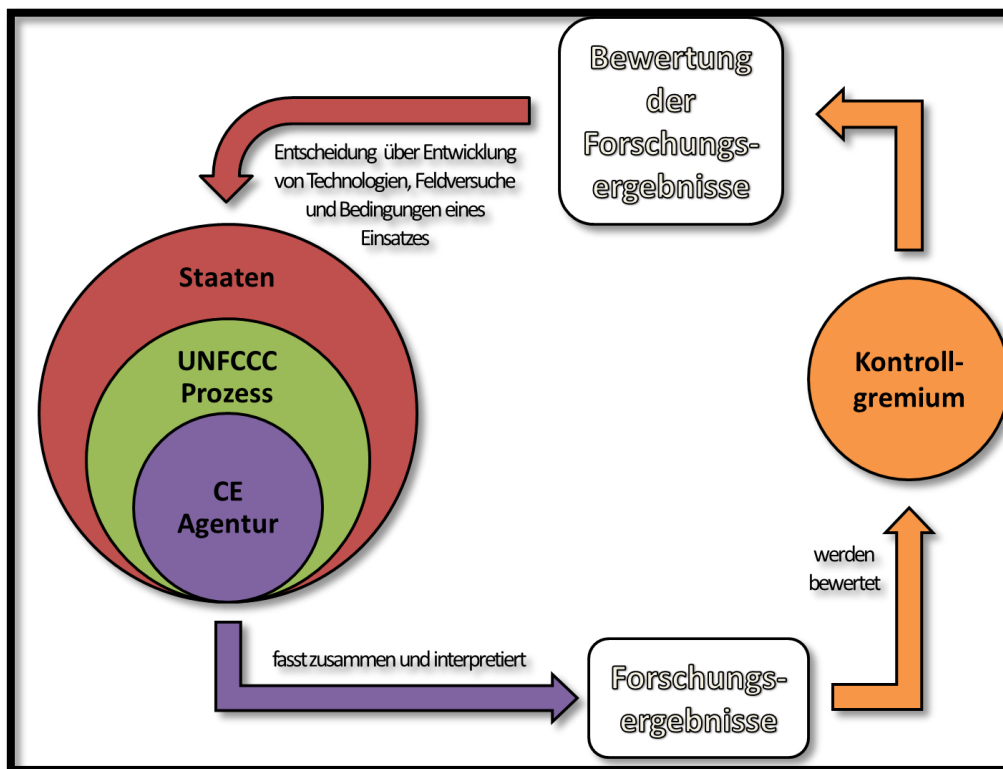


Abbildung 13: Flussschema eines Ansatzes zur Governance. Adaptiert von Rickels et al. (2011). Bild: eigene Erstellung. (Quelle: Rickels et al., 2011, S. 130 – 131).

4.3.2.3 Herausforderungen der Governance

Der Zeitpunkt eines CE Einsatzes und der Stellenwert, den man den Risiken beimisst, sei bei der Bewertung, ob SRM notwendiger- oder vorteilhafterweise eingesetzt werden soll, entscheidend. Kritische Punkte hierbei seien die Erachtung, ab wann die nationale Sicherheit tangiert würde oder die Erachtung eines notwendigen Einsatzes von CE zur Abwendung globaler Katastrophen. (Wiertz & Reichwein, 2010, S. 18)

Hinzu kommt, dass es, um ein international gültiges Rechtsgefüge auszuarbeiten, aufgrund des Konsensprinzipes keine Mehrheitsentscheidungen gebe. Erschwert wird die Ausarbeitung rechtlich gültiger Verträge zudem durch Verteilungsprobleme, die adressiert werden müssen (Rickels et al., 2011, S. 119). Hierbei ist vor allem das Nord-Süd-Gefälle zu nennen, dessen Politisierung das Scheitern einer internationalen Governance bedeuten kann (vgl. Rickels et al., 2011, S. 125). Darüber hinaus können in dem politischen Diskurs um CE auch vermehrt soziale Widerstände auftreten.

Wenn diese Schwierigkeiten überwunden werden können, bleibe immer noch die Frage offen, wie die vereinbarten Regeln zur Anwendung kommen und durchgesetzt werden können (Rickels et al., 2011, S. 119).

Als weiteres Problem, mit der sich die Governance von CE Aktivitäten, und im Besonderen SRM, konfrontiert sieht, wird das Paradox herausgedeutet, dass diejenigen Technologien,

die aufgrund ihrer Erschwinglichkeit von einzelnen Akteuren uni- oder minilateral⁵⁵ durchgeführt werden können, gleichermaßen diejenigen Technologien sind, die für ein erhöhtes Konfliktpotenzial durch Nebenwirkungen in der Bevölkerung sorgen könnten (Zürn & Schäfer, 2011, S. 29).

Durch die für das SAI relativ geringen Kosten (s. Kapitel 4.4) ist es möglich, dass finanzstarke Akteure unilateral handeln, ohne die Mitwirkung von anderen Akteuren (Ott, 2010, S. 41). Diese Akteure könnten die Technologie als potenzielle Waffe benutzen, wenn ein Punkt erreicht wird, an dem die friedliche Nutzung der Technologie nicht mehr garantiert werden kann (Robock, 2008, S. 17). Hamilton (2013, S. 139) führt die Frage an, ob es in der Hand einiger weniger Patenthalter liegen sollte, die Technologien verkaufen zu können, die das Potenzial haben, den Planeten zu retten. Im Zuge dessen nennt er die vom ehemaligen US-Präsidenten Dwight Eisenhower geäußerte Besorgnis, die Menschheit könnte von einer wissenschaftlich-technologischen Elite als Geisel genommen werden.

Zürn & Schäfer (2011, S. 17) beschreiben, dass das Schelling-Kriterium⁵⁶ vom SAI erfüllt wird und ein Einsatz durch eine „Koalition der Willigen“ (Zürn & Schäfer, 2011, S. 25) oder unilateral somit zumindest machbar wäre.

Als zentrale Frage taucht auf, wer entscheidet, um welches Maß die Temperatur gesenkt werden soll. Eine dahingehende Zielsetzung wird von verschiedenen Akteuren unterschiedlich bewertet. Einher damit könnten Bestrebungen gehen, bisherige Grenzen zu erweitern, um den eigenen Lebensraum zu vergrößern (Osterhage, 2016, S. 29).

4.4 Ökonomische Faktoren

4.4.1 **Kostenschätzung**

Im Allgemeinen werden die direkten Einsatzkosten von SRM mittels der Ausbringung von Aerosolen als gering eingeschätzt (Royal Society, 2009, S. 31; Keith et al., 2010, S. 426). Hinzu kommt eine hohe Kosteneffektivität des SAI, das sich als leicht zu bewerkstellende Maßnahme im Hinblick auf die Gefahr katastrophaler Klimaentwicklungen auszeichnet (Zürn & Schäfer, 2011, S. 6; Kiel Earth Institute, 2011, S. 95).

Zu berücksichtigen sind bei der Kostenschätzung Forschungs-, Entwicklungs-, Investitions-, Betriebs-, Entsorgungs- und Folgekosten (Wiederauffrischung der Aerosolschicht bei Sedi-

⁵⁵ Minilateral bedeutet eine kleine Gruppe von Staaten betreffend (vgl. Zürn & Schäfer, 2011, S. 3).

⁵⁶ Das Schelling-Kriterium beschreibt anhand drei Teilthesen die Möglichkeit eines uni- oder minilateralen Einsatzes einer CE Maßnahme. Sind alle drei Teilthesen erfüllt, ist ein uni- oder minilateraler Einsatz überhaupt erst möglich. Die drei Teilthesen sind:

- a) Kosten der CE Maßnahme müssen für den/die Akteur/e erschwinglich sein.
- b) Der Einsatz der in Frage stehenden CE Maßnahme muss auf das Territorium innerhalb der Grenzen des/der ausführenden Staates/Staaten angewendet werden können, was die Machbarkeit der Maßnahme verdeutlichen würde.
- c) Völkerrechtlich liegen keine Hindernisse für den uni- oder minilateralen Einsatz vor. (Zürn & Schäfer, 2011, S. 11)

mentation der Aerosole in die Troposphäre), Kosten bei der Entstehung von Umwelt- und Gesundheitsschäden, Knappheitskosten, volkswirtschaftliche Kosten, sowie die Folgen für die restliche Wirtschaft unter Inkludierung von Einwirkungen z. B. veränderter Beschäftigung oder durch Nutzen für den Klimaschutz (Umweltbundesamt, 2011a, S. 39).

Um Orientierung über die Größenordnung zu bekommen, in der SAI wirtschaftlich zugeordnet wird, lässt sich die Aussage des CIA-Direktor John O. Brennan (2016) unter Berufung auf den amerikanischen *National Research Council* heranziehen, die die jährlichen Kosten eines Einsatzes von SAI mit etwa 10 Mrd. US-Dollar angibt.

Eine bestehende Flotte an Flugzeugen mit dem notwendigen Equipment auszustatten, bewegt sich im Kostenbereich von mehreren Milliarden US-Dollar (Robock et al., 2009, S.7). Rickels et al. (2011, S. 62) beziffert die dahingehenden Investitionen zwischen 18 und 56 Mrd. US-Dollar. Darauf folgende Betriebskosten könnten bei etwa 16 bis 67 Mrd. US-Dollar pro Jahr und pro W/m² liegen.

Die Produktion eigens für die Ausbringung von Aerosolen hergestellter Flugzeugen könnte eine noch größere Effizienz bewirken und mit 6 - 36 Mrd. US-Dollar für Investitionen in neue Flugzeuge und 2 – 12 Mrd. US-Dollar pro Jahr und pro W/m² für die Betriebskosten jener neuen Flotte beziffert werden (Rickels et al., 2011, S. 62).

Als Vergleichswert dient das jährliche Bruttoinlandsprodukt aller Staaten zusammengenommen. Stellt man die Kosten dem Weltsozialprodukt gegenüber, fällt der Anteil von SRM Maßnahmen anteilig an diesem Betrag nicht sehr stark ins Gewicht (Robock et al., 2009, S. 7).

Die Ausbringung durch Luftschiffe wird zwar auch thematisiert, kann aber durch die geringe Ausbringungshöhe von derzeit etwa 6 km noch nicht als zum Einsatz bereitstehende Option diskutiert werden. Für eine zugrunde gelegte Menge von 10 Mt würden sich für Luftschiffe mindestens Investitionskosten zwischen 33 und 40 Mrd. US-Dollar und jährliche Betriebskosten von 8 bis 10 Mrd. US-Dollar ergeben (Kiel Earth Institute, 2011, S. 19).

4.4.2 Methodenproblematik und Diskrepanzen in der Literatur

Die genannten Zahlen bilden nur eine grobe Schätzung ab und beinhalten weder die Folgekosten, die sich durch Rückkopplungen im Klimasystem oder durch die Termination von SAI ergeben könnten, noch die Preiseffekte, die mit veränderter Nachfragesituation auf dem Flugzeug- oder Stoffmarkt einhergeht (Kiel Earth Institute, 2011, S. 96 & 97; Rickels et al., 2011, S. 63).

Die in der Literatur vorliegenden Kostenschätzungen werden daher lediglich abstrakt angegeben (Kiel Earth Institute, 2011, S. 9). Es ist zudem von großen Schwankungen hinsichtlich der Angaben über die Kosten auszugehen, besonders vor dem Hintergrund, zu welchem Zeitpunkt die Publikation erschienen ist. Die Royal Society (2009, S. 35) überschlägt die Kosten für SAI noch mit lediglich 200 Mio. US-Dollar pro W/m².

Außerdem sind variierende Rohstoffpreise durch gesteigerte Nachfrage, Finanzierungsmodalitäten und Skaleneffekte⁵⁷ einige der Faktoren, die eine Kostenschätzung erst hinreichend konkretisieren würden. Die vorliegende Literatur konnte dies nicht bewerkstelligen und somit sind die angegebenen Kostenschätzungen mit möglichen Abweichungen zu betrachten. Schwankungen im Rohstoffpreis zumindest könnten durch die eigens für die Ausbringung hergestellten Nanopartikel auf einem stabilen Preisniveau gehalten werden (Kiel Earth Institute, 2011, S. 16).

Im Allgemeinen wird den Nanopartikeln eine größere Wirtschaftlichkeit zugesprochen als Schwefelpartikeln. Gegenüber Schwefel haben Nanopartikel theoretische Kostenersparnisse um den Faktor 200 (Kiel Earth Institute, 2011, S. 50).

4.4.3 Trends und Beachtenswertes

Mitigationsanstrengungen bis zum Jahre 2100, den Strahlungsantrieb um etwa 2 W/m² zu mindern, würden mit etwa 200 Mrd. US-Dollar pro Jahr und pro W/m² zu Buche schlagen (Royal Society, 2009, S. 35) und sind somit teurer, als SAI zu nutzen (Kiel Earth Institute, 2011, S. 50 – 51; Ott, 2010, S. 41). Das Erreichen einer stabilisierten CO₂-Konzentration auf 450 ppm wird für die Jahre von 2010 bis 2035 mit 18 Billionen US-Dollar beziffert (Kiel Earth Institute, 2011, S. 44).

Beachtet werden muss der Fakt, dass Folgekosten nicht gering ausfallen würden, wenn aufgrund eintretender negativer Nebeneffekte Kompensationszahlungen o.ä. erforderlich werden (Rickels et al., 2011, S. 29).

Die Royal Society (2009, S. 39) führt den Fakt an, dass mit hohem Widerstand dann zu rechnen sei, wenn bereits getätigte Investitionen unbrauchbar werden, wenn entschieden wird, dass die Technologie nicht länger benötigt würde. Als Vergleich hierfür wird der Widerstand herangezogen, der sich in betreffenden Industrien bemerkbar macht, wenn über die Abschaffung fossiler Brennstoffe diskutiert wird. Damit sich die ins SRM getätigten Investitionen amortisieren können – so kann argumentiert werden – könne ein wirtschaftliches Interesse darin bestehen, CO₂-Emissionen nicht zu stark zu reduzieren (Rickels et al., 2011, S. 34).

⁵⁷ Skaleneffekt meint die Reduzierung der Produktionskosten in Abhängigkeit von der Anzahl der zu produzierenden Stückzahlen von z. B. Flugzeugen oder Ballons über den Lauf einer bestimmten Zeitspanne (Rickels et al., 2011, S. 64).

5 Kontroverse

Dieses Kapitel stellt Hinweise zusammen, die auf eine derzeitige Anwendung von SAI hindeuten könnten. Entgegen den Aussagen der Studien, SAI würde noch nicht durchgeführt, besteht der Verdacht – 17 % der Befragten einer internationalen Umfrage sind überzeugt davon, dass verdeckte SAI Maßnahmen stattfinden (Shearer et al., 2016, S. 1) – dass der Stand der Wissenschaft, auf den sich in der Literatur bezogen wird, nicht wiederzugeben vermag, was an großskaliger Anwendung bereits stattfindet.

*Public Employees for Environmental Responsibility (PEER)*⁵⁸ berichtet im Oktober 2015 über die zunehmenden Restriktionen innerhalb des *National Weather Service* der USA (Public Employees for Environmental Responsibility, 2015). Diese in den USA im letzten Jahr hervorgehenden *Nondisclosure Agreements* machen es Mitarbeitern von z. B. Wetterbehörden unmöglich, außerhalb der Behörden, in denen sie arbeiten, ungestraft über die Vorgänge zu sprechen, die das Klima betreffen. Entgegen der steten Aussage, beim SAI handle es sich derzeit noch nicht um die Erprobung (Cairns, 2014, S. 4), wird anhand dieses Kapitels die Möglichkeit untersucht, ob CE bereits stattfindet.

Ein Teil der Bevölkerung ist durchaus durch sichtbare Phänomene wie Gittermuster von persistenten Kondensstreifen besorgt, denn sie werden mit Patenten, Regenwasser-, Sediment- oder Luftanalysen in einen Kontext gebracht, dem von führenden Instituten durch fehlende eigene Analysen, noch nicht ausreichend Rechnung getragen wurde. Nach Beurteilung des Umweltbundesamtes (Umweltbundesamt, 2016b), der NASA, des Met Office und des DLR bedürfen Aluminium und Barium keiner Messungen in der Atmosphäre, da keine Notwendigkeit dafür bestehe. (vgl. Hancke, 2015)

Der Rahmen, in dem die Tatsache untersucht werden muss, ob SAI bereits durchgeführt wird, ist nicht auf einzelne Nationen einzugrenzen. Das Phänomen persistenter Kondensstreifen, die mit SAI in Verbindung gebracht werden, werde weltweit öffentlich diskutiert (vgl. Cairns, 2014, S. 4). Auf Internetplattformen wird das Phänomen anhand von Fotografien und stofflicher Analysen von Regenwasser, Schnee oder Sediment erörtert (Shearer et al., 2016, S. 2).

Die folgenden Indizien für einen derzeit stattfindenden Einsatz von SAI erheben weder Anspruch auf die absolute Vollständigkeit der Daten noch werden sie bewertet. Aufgrund größtenteils fehlender wissenschaftlicher Literatur auf diesem Gebiet wird auf Messungen, Experten, Aussagen und eine kürzlich erschienene Studie Bezug genommen, die einen flächendeckenderen Blick auf das vielschichtige Thema ermöglicht.

⁵⁸ Die Non-Profit-Organisation *Public Employees for Environmental Responsibility (PEER)* bietet öffentlich Bediensteten in den USA die Möglichkeit, anonym Missstände in deren jeweiligen Behörden zu adressieren, um daraufhin rechtliche Schritte einzuleiten.

5.1 Messungen

Das Instrument derjenigen, die überzeugt davon sind, dass CE Programme, die mit der in Kapitel 3 beschriebenen Technologie bereits durchgeführt werden, sind Messungen frei aufgefangenen Regenwassers, die einen Nachweis über das Vorhandensein von Stoffen wie Aluminium und Barium in der Luft erbringen sollen.

5.1.1 Regenwasser- und Sedimentanalysen

Messergebnisse von aufgefangenem Regenwasser wurden dem Landtagsabgeordneten Martin Bäumer von Bürgern vorgelegt. Die durchgeführten Regenwasseranalysen sagen 20-fach höhere Aluminiumkonzentrationen als im Trinkwasser⁵⁹ aus (Niedersächsischer Landtag (17. Wahlperiode), 2016, S. 1).

Jigyasu et al. (2014, S. 436) fanden in ihren, zwölf Monate durchgeführten Untersuchungen zur Mobilität von Aluminium im Fluss Gomati, der durch die indische Gangesebene fließt⁶⁰, heraus, dass die Aluminiumkonzentration in den Monsunmonaten Juni bis September anstieg und durchschnittlich 5.289 µg/L betrug (s. Abbildung 14). Dies sei eine 165-fache Erhöhung zum von der Weltgesundheitsorganisation (WHO) für Trinkwasser vorgegebenen Grenzwert von 200 µg/L. Hervorgehoben wird in der Studie, dass Aluminium, aufgrund seiner geringen Löslichkeit einen Wert in Flüssen von 100 µg/L selten übersteige und als immobiles Element gelte (Jigyasu et al., 2014, S. 434, 436).

Die Ergebnisse der Studie zeigten durch die hohen Aluminiumkonzentrationen, dass, abweichend von seiner stofflichen Eigenschaft, Aluminium als mobiles Element eingestuft und eine verfügbare Quelle des Stoffes im Sediment vermutet werden müsse (Jigyasu et al., 2014, S. 437).

Herndon (2015, S. 2177) vermutet, dass das bei Jigyasu et al. (2014) festgestellte, mobilisierte Aluminium als atmosphärische Belastung vorliegt und durch den Monsun in den Gomati gelange. Das Aluminium komme dabei aus Kohlenflugasche, die in verdeckten, bereits durchgeführten Geoengineering-Operationen vorkomme. Er schlägt vor, Regenwasseranalysen in dieser Gegend durchzuführen, um Einsicht darüber zu gewinnen, ob das Aluminium aus der Atmosphäre kommt.

Das Umweltbundesamt (2016b) beschreibt, dass durch sauren Regen in Form von saurem Sickerwasser Schwermetalle, Nährstoffe und Aluminium mobilisiert werden können.

⁵⁹ Der Grenzwert von Aluminium der Trinkwasserverordnung beträgt 200 µg/L. Zum Vergleich existieren Messergebnisse aus den 1990er Jahren und aus halbquantitativen Messungen, die für Regenwasser „deutlich unter 0,2 µg/L“ (Umweltbundesamt, 2016b) liegen.

⁶⁰ Der Fluss Gomati wurde gewählt, da ihm kein Wasser des Himalaya-Gebirges zuströmt und somit die geochemischen Einflüsse der Gangesebene selbst untersucht werden können (Jigyasu et al., 2014, S. 435).

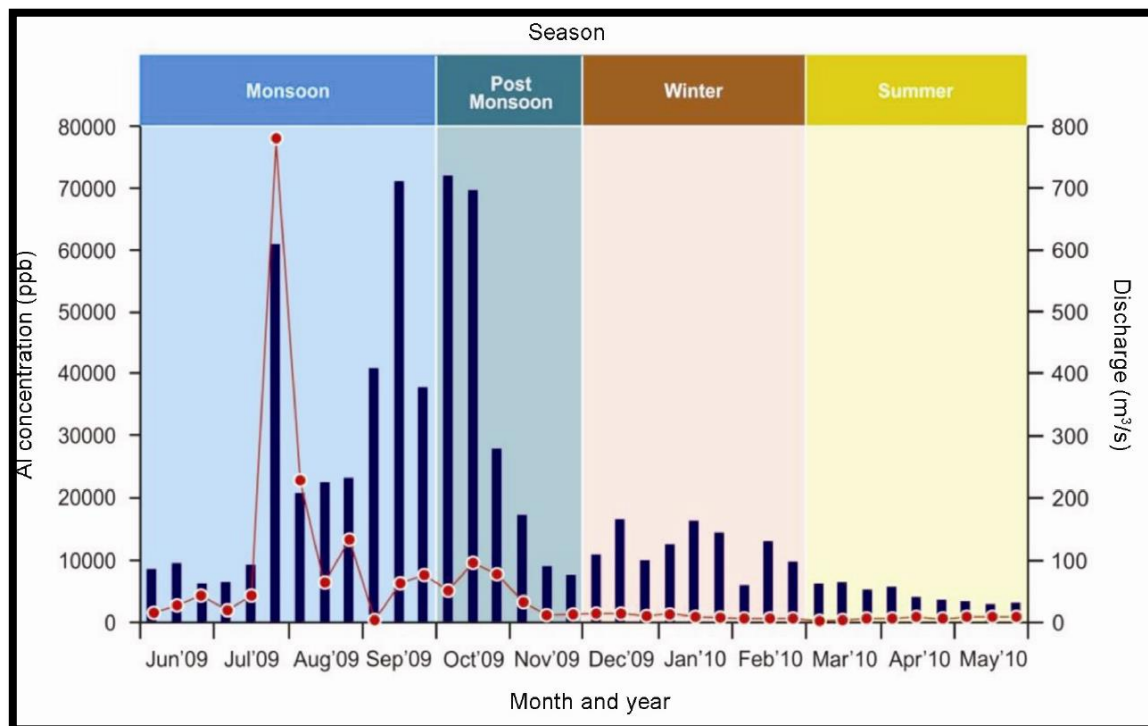


Abbildung 14: Zwölfmonatige Messuntersuchung von Aluminium-Konzentrationen im Fluss Gomati in Indien. Messungen des Wasserdurchflusses (in m^3/s) und der Aluminiumkonzentration (in ppb^{61}) wurden alle 10 Tage durchgeführt. (Quelle: Jigyasu et al., 2014, S. 436).

Vom Umweltbundesamt erfasste Konzentrationen in Niederschlagswasser bewegen sich „größtenteils deutlich unter $0,2 \text{ mg/L}$ “ (Umweltbundesamt, 2016b). Die Werte stammen sowohl aus den 1990er Jahren als auch aus halbquantitativen Messungen von Aluminium-Signalen im Rahmen einer Massenspektroskopie⁶². Die Werte dienen jedoch nur als grobe Orientierung. Es besteht keine Notwendigkeit Aluminium näher zu untersuchen, da es für die Thematiken, mit denen sich das Umweltbundesamt befasst, ohne Belang sei (Umweltbundesamt, 2016b).

Barium wird im Luftmessnetz des Umweltbundesamtes ebenfalls mit halbquantitativen Messungen erfasst und kann in Regenwasseranalysen mit Werten „deutlich unter $0,01 \text{ mg/L}$ “ (Umweltbundesamt, 2016b) quantifiziert werden.⁶³ Für Trinkwasser gibt es für Barium zwar keinen Grenzwert⁶⁴, jedoch könne der Leitwert der WHO von $700 \mu\text{g/L}$ herangezogen werden (Umweltbundesamt, 2016b).

⁶¹ Parts-per-billion (dt.: Teile pro Milliarde) – 1 ppb entspricht $1 \mu\text{g/L}$.

⁶² Dieses Signal wird anhand des QuickScan-Modus bei der Massenspektroskopie (ICP-MS) ermittelt (Umweltbundesamt, 2016b).

⁶³ Für exakt $0,01 \text{ mg/L}$ ergäbe sich eine exorbitante Überschreitung der typischen Massenkonzentrationen von 50 ng Barium pro m^3 (s. Kapitel 5.1.2). Auf die Rückfrage beim Umweltbundesamt, ob es sich womöglich um einen Tippfehler handeln könne, ging bis zum Zeitpunkt der Abgabe keine Antwort ein.

⁶⁴ Im Rahmen der Überarbeitung der EU-Trinkwasserrichtlinie im Jahre 1998 wurde die Anzahl der zu untersuchenden Parameter stark reduziert (Umweltbundesamt, 2016b).

Zwischen 2007 und 2013 durchgeführte Messungen aufgefangenen Regenwassers in Kalifornien zeigen Werte in einem Bereich von 7,2 bis 3450 $\mu\text{g/L}$ für Aluminium und von 1,2 bis 43 $\mu\text{g/L}$ für Barium. Die Werte werden von der Initiative *GeoengineeringWatch* mit verdeckten Geoengineering-Programmen in Verbindung gebracht.

Untersuchtes Sediment eines Teiches, wies 375.000 $\mu\text{g/L}$ für Aluminium und 3.090 $\mu\text{g/L}$ für Barium auf (Wigington, 2016b).

Eine kürzlich veröffentlichte Studie äußert sich zu dieser und weiterer Messungen aus verschiedenen Bundesstaaten in den USA in der Form einer Expertenumfrage. 86 % der in dieser Studie zu Wort kommenden Experten sehen diese Messung nicht als Erklärung für verdeckte SAI-Experimente. Etwa die Hälfte jener befragten Experten begründen diese Aussage damit, dass die gemessenen Konzentrationen üblich seien, die andere Hälfte der Befragten argumentieren, die Konzentrationen seien entweder natürlichen, industriellen oder unbekanntem Ursprungs (Shearer et al., 2016, S. 4 – 5).

Eigene Messungen wurden im Rahmen der Studie von Shearer et al. (2016) nicht vorgenommen.

5.1.2 Luft- und Flugzeugabgasuntersuchungen

Zweitausend in Niedersachsen angesiedelte Betriebe müssen gemäß 11. BImSchV, § 4, Abs. 1 alle vier Jahre ihre Emissionen deklarieren. Dabei beläuft sich die Anzahl derjenigen Betriebe in Niedersachsen, die Aluminiumverbindungen emittieren laut der *Lufthygienischen Überwachung Niedersachsen (LUEN)* auf 34 (Bahn, 2016)⁶⁵. Typische Emissionsquellen können sowohl Industrieabgase (Bahn, 2016) als auch „aufgewirbelte mineralische Staubpartikel“ (Umweltbundesamt, 2016b) sein.

Aluminium und Barium werden im Rahmen der lufthygienischen Überwachung nicht erfasst (Siewert, 2016)(s. Anhang B).⁶⁶ Typische Massekonzentrationen von Aluminium werden üblicherweise mit Massenkonzentrationsbereichen von 10 bis 500 ng/m^3 im ländlichen und mit 10 bis 1000 ng/m^3 im städtischen Bereich angegeben. Für Barium gilt, dass bis zu 5 ng/m^3 im ländlichen und 10 bis 50 ng/m^3 im städtischen Gebiet typischerweise vorkommen können (VDI, 2015, S. 4).

Das Umweltbundesamt vermag zwar im eigenen Luftmessnetz Aluminiumkonzentrationen im Zuge von Feinstaubanalysen⁶⁷ der Luft mittels Massenspektroskopie ein halbquantitative

⁶⁵ Das Bundesland Niedersachsen wurde zur Ermittlung von Daten zum Aluminiumgehalt der Luft herangezogen, da eine kleine Anfrage des umweltpolitischen Sprechers der CDU-Fraktion in Niedersachsen, Martin Bäumer, bezüglich Geoengineering an die Landtagsregierung desselbigen gestellt wurde (Niedersächsischer Landtag (17. Wahlperiode), 2016).

Die im Rahmen dieser Bachelorthesis ans LUEN gestellte Anfrage diente dem Versuch zur Gewinnung eigener empirischer Daten.

⁶⁶ Die 39. BImSchV verlangt rechtlich keine Messung von Aluminium oder Barium (Niedersächsischer Landtag (17. Wahlperiode), 2016, S. 3)

⁶⁷ Die Feinstaubanalyse PM_{10} , bei der Partikel in der Luft mit einem Filter der Größe 10 μm bestimmt werden, erlaubt eine maximale tägliche Belastung von 50 $\mu\text{g/m}^3$, die weniger als 35 Mal im Jahr überschritten werden darf (Umweltbundesamt, 2016c).

Aluminiumsignal zu messen (vgl. Kapitel 5.1.1), dieses Aluminium-Signal werde jedoch nicht näher ausgewertet, da keine Notwendigkeit hierfür gesehen wird. Für diese Analyse müssen die gesammelten Partikel einer Feinstaubanalyse aufgeschlossen werden. Aluminium kann mit der Methode des Umweltbundesamtes allerdings nicht vollständig aufgeschlossen werden. Zudem ist die Größe der Partikel für die Feinstaubanalyse bedeutend, da eine ausreichend große Masse erreicht werden muss, um eine Analyse zu ermöglichen. (Umweltbundesamt, 2016b)

Daniel (2011) von der amerikanischen *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) beschreibt, dass im Jahrzehnt nach dem Jahre 2000 „[S]tratospheric aerosol increased surprisingly rapidly in that time, almost doubling during the decade, [...]“ (Daniel, 2011). Die, im Vergleich zu den Jahren zuvor, geringere Erwärmung des Klimas wird diesbezüglich mit der Zunahme an Aerosolen in Verbindung gebracht – wieso diese Verdopplung eingetreten ist, sei jedoch noch nicht verstanden worden.

Das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) prüft bislang in Kondensstreifen von Flugzeugen die Parameter Stickoxide, Salpetersäure, Schwefelverbindungen, Rußpartikel und organische Verbindungen, sieht jedoch für die Messung der Parameter Aluminium und Barium keine Notwendigkeit (vgl. Hancke, 2015). Messungen von Hancke (2015) ergeben eine Konzentration von $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ Barium für in der Atmosphäre genommene Luftproben.⁶⁸

Im Zuge einer Abgasmessung von Flugzeugen am Züricher Flughafen, fanden Abegglen et al. (2016, S. 192) neben Rußpartikeln und anderen Metallen⁶⁹ Aluminium und Barium. Die gemessenen Aluminiumwerte können von Kerosin, Öl oder Verschleiß der Turbinen, Bariumwerte hingegen ausschließlich aus dem Kerosin herrühren. Messungen des Kerosins haben neben Konzentrationen von Aluminium, auch Schwefel aufgewiesen (Abegglen et al., 2016, S. 194 – 195). Es wird hervorgehoben, dass bisher nur sehr wenige Studien zu einzelnen Stoffen in Flugzeugabgasen durchgeführt wurden und keine einzige hinsichtlich gemessener Emissionswerte unverzüglich nach dem Ausstoß der Abgase (Abegglen et al., 2016, S. 183).

Nennenswert ist, dass die vorgeschlagenen Stoffe Aluminium und Barium in einer Haaranalyse eines Bürgers aus Niedersachsen gefunden wurden. Aus der Haaranalyse vom Jahre 2016 gingen im Vergleich zu einer vorausgegangenen Haarprobe im Jahre 2011 leicht bis mittel erhöhte Messwerte dieser beiden Stoffe hervor (Niedersächsischer Landtag (17. Wahlperiode), 2016, S. 1).

⁶⁸ Dieser Wert wurde von der absoluten Konzentration von 0,08 mg eines 14 Liter umfassenden Luftprobevolumens hochgerechnet.

⁶⁹ Metalle, die in Abgasproben gefunden wurden umfassen Molybdän, Kalzium, Natrium, Eisen, Kupfer, Chrom, Silizium, Magnesium, Kobalt, Mangan, Vanadium, Nickel, Blei, Titan und Zirconium.

5.2 Stellungnahmen zur Anwendung von SAI

5.2.1 Institute und Behörden

Dass die Technologie bei Bedarf innerhalb weniger Jahre zur Anwendung bereit sein könne, beschreibt die Royal Society (2009, S. 36). Darüber jedoch, dass die Anwendung von SAI bereits stattfindet, liegt von offizieller Seite keine Kenntnis vor (Umweltbundesamt, 2016b; Niedersächsischer Landtag (17. Wahlperiode), 2016, S. 4). Die Begründung dafür ist zum einen, es lägen keine wissenschaftlichen Befunde vor, die eine weitergehende Untersuchung erforderlich machen würden, zum anderen wird auf die, für die Luftüberwachung zuständigen, Behörden verwiesen, deren Kenntnis sich das Vorkommen von Aluminium oder Barium in der Luft entzieht (Niedersächsischer Landtag (17. Wahlperiode), 2016, S. 5 – 6).

Da Aluminium- und Bariumverbindungen für SAI zu verwenden, lediglich als theoretische Vorschläge diskutiert würden, bestehe kein Anlass zu einer vertiefenden Untersuchung dieser Parameter (Umweltbundesamt, 2016b).

Das Umweltbundesamt (2011b, S. 1 - 2) beschreibt auf vielfache Anfrage von Bürgern das Phänomen, dass Flugzeuge Chemikalien in die Atmosphäre ausbringen als „Chemtrails“ und diskreditiert die Quellen, die jene Chemtrails behandeln, als unglaubwürdig.

Dass solche Programme bereits stattfinden, wird von Mercer et al. (2011, S. 7) als Verschwörungstheorie verworfen. Die Wahrnehmung, dass Geoengineering, oder auch „Chemtrails“ wie es oft im Internet bezeichnet wird, existieren könnten, ist kein neues Phänomen. Der Begriff wird in Zusammenhang mit einer Verschwörung gebracht, dessen Fehlen „[...] in social scientific work on geoengineering is striking.“ (Cairns, 2014, S. 5).

Parteien, die von einer derzeitigen Ausbringung stratosphärischer Aerosole überzeugt sind, sähen sich mit einer zunehmenden Anzahl an Publikationen zum SRM in ihrer Ansicht bestätigt (Cairns, 2014, S. 20).



Abbildung 15: Dünne Wolken am Himmel. Bild: fotolia / wollertz (Ausschnitt). (Quelle: www.spektrum.de)

Die Deutsche Flugsicherung, der Deutsche Wetterdienst und das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt sehen keine Indizien für eine derzeitige Anwendung von SAI (Umweltbundesamt, 2016b). Auch Shearer et al. (2016, S. 8) bewerten die derzeitige Ausbringung von

Aerosolen in die Stratosphäre als nicht existent. Darüber hinaus wird erwähnt, dass die Theorie, es handle sich um verdeckte Experimente, keine von Experten überprüften Tatsachen anführe (Shearer et al., 2016, S. 1).

Long (2015) beschreibt, dass das Global Dimming der 1970er und 1980er Jahre durch Emissionskontrolle und einer damit verbundenen Reduktion von Aerosolen in der Atmosphäre beseitigt werden konnte. Damit einhergehen müsse eine Zunahme in direkter Sonnenstrahlung, die sich jedoch von 1995 bis 2007 nahezu nicht verändert habe. Tendenziell stieg die diffuse Sonneneinstrahlung eher an, was wiederum nicht mit der Abnahme von Aerosolen erklärbar sei. (Long, 2015)

„Versehentliches Geoengineering“ (Long, 2015), das durch Flugzeugabgase (vgl. Abbildung 15) entstehenden Eisnebel zustande komme, könnte eine Erklärung für diese Entwicklung sein, bedürfe allerdings vertiefterer Forschungen.

5.2.2 Stimmen & Organisationen gegen CE/SAI

Die ETC Group (2010b, S. 33) sieht in dem Vorhaben, SRM einzusetzen eine Verletzung der ENMOD Konvention. Darüber hinaus hat die ETC Group eine Karte erstellt, auf der bisher zum Einsatz gekommene Maßnahmen und derzeit berichtete Aktivitäten bezüglich Wettermodifikation dargestellt werden (vgl. ETC Group, 2012).

Im Rahmen der Konferenz „Beyond Theories of Weather Modification – Civil Society against Geoengineering“ im EU Parlament äußerte sich der EU-Abgeordnete Werner Schulz im April 2013, dass „[...] dieses Experiment, was ja bereits gestartet worden ist, das ist ja nicht nur, dass wir hier über Forschung reden, sondern hier wird bereits ja angewendet, hier wird ja bereits äh ein, ein Himmel in einer gewissen Weise verarbeitet [...]“ (Schulz, 2013). Der Kontext der Aussage, dass damit tatsächlich stattfindende, geheime Experimente gemeint seien, wurde daraufhin für ein Missverständnis erklärt (parlamentwatch e.V., 2013).

Dem EU Parlament wurde nach dieser Konferenz eine Petition vorgelegt, die eine Ermittlung aller militärischen, die Umwelt betreffenden, Aktivitäten in Form einer Publikation fordert. Die Petition wurde im Februar 2014 akzeptiert (European Parliament (2014 - 2019) - Committee on Petitions, 2016). Eine Petition gegen das SRM wurde im Jahre 2010 beim Deutschen Bundestag mit etwa 3.000 Unterschriften eingereicht (Renn et al., 2011, S. 4 – 5).

Besorgte Bürger legten dem umweltpolitischen Sprecher der CDU Fraktion Martin Bäumer im niedersächsischen Landtag Messergebnisse einer Regenwasseranalyse vor, die zwanzigfach erhöhte Aluminiumwerte gegenüber Trinkwasserqualität⁷⁰ aussagen (Niedersächsischer Landtag (17. Wahlperiode), 2016, S. 1). Die darauf folgende Anfrage an die niedersächsische Landesregierung, wie die Auswirkungen von Geoengineering auf das Land Niedersachsen seien, wurde damit beantwortet, dass keine Kenntnis von angewandten CE Maß-

⁷⁰ Der Grenzwert der Trinkwasserverordnung für Aluminium beträgt 200 µg/L.

nahmen vorliege. Die Kosten für eine erforderliche Analytik für die in Frage stehenden Stoffe Aluminium und Barium sollen sich etwa auf einen fünfstelligen Betrag belaufen. (Niedersächsischer Landtag (17. Wahlperiode), 2016, S. 6; 8)

Für die Anfrage wurde Bäumer von Mitgliedern des Landtages Niedersachsen kritisiert (Michalsky, 2016).

Die amerikanische Initiative *GeoengineeringWatch* führt an, dass Programme des SAI bereits angewendet werden. Zu diesem Zwecke wurde dem Thema eine Diskussion vor dem Aufsichtsrat von Shasta County, Kalifornien, eingeräumt (Shasta County Board of Supervisors, 2014, S. 7). Darin werden unter anderem besonders hohe Messwerte an Aluminium in frei aufgefangenem Regenwasser und Schnee der Bergspitze des Mount Shasta in Kalifornien und im Boden in der Gegend um Redding im Norden Kaliforniens erwähnt (GeoEngineeringWatch.org (Regie), 2014). Dies wird mit den vorgeschlagenen Chemikalien und vorliegenden Patenten in Verbindung gebracht. Die Redner – zu denen ein ehemaliger Meteorologe, ein Biologe, Piloten, ein Neurologe, ein Arzt sowie ein ehemaliger Mitarbeiter des Militärs gehören – äußern sich dazu, dass sie in ihrer jeweiligen Expertise bestätigen können, dass ein Verdacht bestehe, dass CE Programme in Nordkalifornien durchgeführt werden.

GeoengineeringWatch klagte in Zusammenarbeit mit einer zusammengestellten Gruppe von Anwälten im Juni 2016 diverse amerikanische Behörden dafür an, im geheimen stattfindende Programme zum SAI durchzuführen oder zu billigen. Die Organisation erhofft sich davon „[...] [to] halt the ongoing global climate engineering assault against our planet [...]“ (Wigington, 2016a).

Der Überzeugung, dass Geoengineering in Form von SRM und der Ausbringung von Aerosolen bereits durchgeführt wird, ist auch die Bürgerinitiative *Sauberer Himmel*. Messungen der Mitglieder der Initiative umfassen 72 Proben, von denen nach eigenen Angaben in 55 Proben Aluminium in frei aufgefangenem Regenwasser nachgewiesen wurde (Weis, 2012).⁷¹

Die ehemalige Bio-Umwelttechnikerin der US Air Force, Kristen Meghan⁷², verließ die US-Armee im Jahre 2010 als sog. Whistleblowerin. Meghan (2014) beschreibt, große Mengen an Aluminium und Barium – in Form von Oxiden und Sulfaten – im Datenbanksystem der US-Armee gefunden zu haben, die weder die erforderlichen Herstellerangaben noch Verwendungszwecke aufwiesen. Auf eigene Messungen hin findet Meghan (2014) nach eigenen Aussagen hohe Werte in Luft- und Bodenproben.⁷³

⁷¹ Im Rahmen dieser Bachelorarbeit wurden die Laborberichte dieser Untersuchung angefragt. Die Anfrage blieb unbeantwortet.

⁷² Einen Nachweis ihrer ehemaligen Tätigkeiten liefert Meghan (2013) in einem Video ihres YouTube-Kanals.

⁷³ Eine Anfrage an Kristen Meghan im Rahmen dieser Bachelorthesis nach den Laborberichten der Luft- und Bodenanalysen per E-Mail im Juli sowie nochmals im August 2016 blieb unbeantwortet.

Der Neurobiologe Dietrich Klinghardt (2014) äußert sich auf dem Kongress für alternative Heilmedizin dazu, dass Aluminium, Barium und Strontium die am häufigsten, nach einer Methode zur Filterung von Blut, gefundenen Toxine seien. Zu persistenten Kondensstreifen von Flugzeugen äußert er sich dahingehend, dass dies „[...] offensichtlich dazu da sein [soll], die Sonne abzuschirmen, so 'ne Art Hitzeschild gegenüber der Sonne [...]“ (Klinghardt, 2014). Er führt an, dass die gefilterten Stoffe von Emissionen jener persistenter Kondensstreifen herühren.

6 Diskussion

Um den Stand der Wissenschaft und der Technologie so genau wie möglich erfassen zu können, ist neben den Themengebieten, die im Folgenden diskutiert werden, auch ein Blick auf die historischen Ereignisse (Kapitel 2.2.4) nötig. Bestrebungen, das Wetter zu modifizieren oder ohne Mitwissen der Bevölkerung Experimente durchzuführen, sind in den vergangenen Jahrzehnten und bis in die frühe Nachkriegszeit (Zweiter Weltkrieg) durchgeführt worden. Auf Grundlage jener empirischer Daten lässt sich vermuten, dass nicht der volle Umfang dessen, was in dieser Bachelorthesis als ‚Stand der Wissenschaft‘ gilt, tatsächlich den Fortschritt der Technologie angibt, der angewandt werden kann.

Im Folgenden werden die in den vorangegangenen Kapiteln zusammengetragenen und wichtigsten Fakten – nach Themenschwerpunkten geordnet – diskutiert, dabei zusammenhängend erörtert und somit für die Schlussfolgerung aufbereitet.

6.1 Forschung & Technologie

Als ersten Punkt zur Abhandlung, den Stand der Wissenschaft zum SRM zu erfassen, ist die Forschung zu benennen. Die Ausführungen haben gezeigt, dass entgegen der Aussagen, die Forschung stecke noch in den Anfängen, bereits ein hohes Maß an Forschungsaktivität festgestellt werden kann. Dies wird nicht nur aufgrund einer Zunahme an Publikationen im ersten Jahrzehnt nach der Jahrtausendwende (Kapitel 4.1) deutlich, sondern kann auch mit der relativ koordinierten Förderung von Forschungsprojekten durch Organe wie z. B. der Europäischen Union begründet werden (Kapitel 3.1.2). Hinzu kommt noch die Involvierung privater Akteure (Kapitel 3.1.1.3), die bei ausreichenden finanziellen Mitteln, eigene, keiner Regulierung unterworfenen Forschungen anstellen können. Eine damit verbundene bereits stattfindende Forschung ist demnach evident. Dass sogar eine Erprobung bereits kurz bevorstand, zeigt das SPICE Projekt (Kapitel 3.1.2). Darüber hinaus wurden Aussagen getroffen, dass die SAI-Technologie bereits zur Anwendung kommen könne, sollte dies erforderlich sein (Kapitel 5.2.1).

Die Kritik, dass bereits über das „Wie“ anstatt über das „Ob“ der Forschung diskutiert wird, verdeutlicht die Tendenz, Forschungsbestrebungen nachzugehen (Kapitel 3.1.1.1). SRM richtet sich nicht an die Reduzierung der Treibhausgaskonzentration, jedoch ist das Potenzial, das SAI hinsichtlich seines Vermögens, den Strahlungshaushalt zu beeinflussen innewohnt, immens. SAI wird dabei als die effektivste Technologie des SRM gesehen (Kapitel 3.3.1). Modellsimulationen konnten zeigen, dass die Temperatur auf vorindustrielles Niveau gesenkt werden kann und positive Auswirkungen auf die Temperatur z. B. in der Arktis haben kann.

Über die Unwägbarkeiten der bisherigen Modelle wurden ebenfalls Aussagen getroffen. So bestehen zum Beispiel Mängel hinsichtlich der Aerosoldynamik zwischen Tropo- und Stratosphäre. Die Limitierungen von Modellen wurde im Allgemeinen thematisiert, zum einen aufgrund fehlender Möglichkeiten, Chancen und Auswirkungen konkret formulieren zu kön-

nen, zum anderen, weil Modelle eben lediglich Abbildungen der Realität sind und durch hohe Unsicherheiten in Entwicklungspfaden von z. B. Kippelementen auch trotz einer möglichst genauen Modellierung nicht erfasst werden können.

Obwohl (oder gerade weil) dieser Umstand vorliegt, werden Feldversuche gefordert, die eine größere Erkenntnis über die bisher wenig prognostizierbaren Auswirkungen und Chancen von SAI als Laborexperimente erlauben. Dem entgegen steht die Ansicht, dass verantwortungsbewusste Forschung derzeit lediglich im Rahmen von Laborexperimenten und Modellierungen stattfinden könne. (Kapitel 3.1.2)

Diese unabgestimmten Aussagen deuten auf große Unterschiede im Forschungsfortschritt und der Herangehensweise der forschenden Institute hin.

6.2 Chemikalien und Auswirkungen

Die Analyse hat außerdem die Unterschiede der vorgeschlagenen Chemikalien herausgeleitet. Es wurde gezeigt, dass Aluminiumoxid – im Vergleich zu Sulfataerosolen – Wärmestrahlung vermindern, diffuse Strahlung reduzieren und einen geringeren Abbau von Ozon bewirken kann. Es ist daher davon auszugehen, dass Aluminiumoxid als geeigneterer Stoff für die Ausbringung von Aerosolen angesehen wird als Schwefeldioxid oder Schwefelsäure. Zudem besitzt Aluminiumoxid eine höhere Verweildauer in der Stratosphäre, was die Effektivität des Stoffes noch unterstreicht. (Kapitel 3.4.2)

Dass nach der Verweildauer die Aerosole in die Troposphäre und in letzter Instanz durch Niederschlag auf die Erdoberfläche gelangen, wurde in den einschlägigen Studien und Hintergrundpapieren erstaunlicherweise nicht benannt. Lediglich das Planungsamt der Bundeswehr erwähnt nebenbei, dass die in die Troposphäre gelangenden Partikel einen Einfluss auf den Flugverkehr und die Umwelt haben. Nur *eine* aktuellere Studie befasste sich mit den Konsequenzen auf das Schutzgut Mensch, die sich aus dem Fallout dieser, in die Stratosphäre injizierten, Aerosole ergeben. Beschriebene Auswirkungen wurden durch interdisziplinäre Recherche ermittelt. (Kapitel 3.5.1 & 3.5.3)

Auswirkungen von SAI, die Rückkopplungen auf Ökosysteme hervorrufen können, können nicht ausreichend benannt (vgl. Kapitel 3.3.1) werden. Von stofflicher Seite können die Auswirkungen nur qualitativ angegeben werden, indem auf die – durch erhöhte diffuse Strahlung potenziell entstehenden – Kohlenstoffsinken Bezug genommen wurde. Auswirkungen auf den Wasserkreislauf wurden zwar in die gesamt-klimatische Betrachtung eingeordnet, jedoch wurde kein Bezug zu stofflichen Veränderungen genommen, die durch den Fallout hervorgerufen werden könnten. Die Toxizität, die von Aluminium auf das Schutzgut Mensch ausgeht, konnte deutlich erfasst werden.

Das Potenzial, durch SAI Niederschlagsmuster zu verändern, ist immens, jedoch noch mit großen Unsicherheiten behaftet (Kapitel 3.5.2.1). Auch für den Fall, dass SAI angewendet und irgendeinmal abgebrochen werden sollte, kann keine Aussage über die Niederschlagsverteilung getroffen werden (Kapitel 3.5.2.3). Die damit einhergehende, mögliche Entstehung von Dürren, die Regionen überlebenswichtiges Wasser entziehen könnte, wurde lediglich von Alan Robock wiederholt benannt und von der SRMGI thematisiert, jedoch nur auf die

asiatischen und afrikanischen Monsunregionen eingegrenzt. Dass dies die einzigen Gegenden sein werden, die von veränderten Niederschlagsmustern infolge von SAI betroffen sein werden, erscheint vor dem Hintergrund der immensen Komplexität der Klimamechanismen unwahrscheinlich.

Das Kapitel 3.6, das die Evaluierung von SAI als eine Art Zwischenfazit ermöglichen sollte, konnte nicht um die o.g. Faktoren ergänzt werden, da keine hinreichend konkreten Aussagen darüber in den großen Studien getroffen wurden. Für die Argumentation darüber, ob SRM/SAI erforscht und eingesetzt werden soll, fehlt somit ein bedeutendes und gewichtiges Argument.

6.3 Wahrnehmung in Gesellschaft, Wissenschaft und Politik

Diese Analyse hat außerdem gezeigt, dass die Wahrnehmung von Climate Engineering Maßnahmen im Allgemeinen in der Öffentlichkeit schwach ausgeprägt ist (Kapitel 4.1.1). In angelsächsischen Ländern ist im Vergleich zur deutschen Öffentlichkeit ein höheres Bewusstsein über SRM vorhanden. Obwohl bisher die Öffentlichkeit noch nicht in den Diskurs um CE einbezogen wurde, wird Widerstand erwartet. Das bisher fehlende Einbeziehen der Bevölkerung in die Debatte und fehlende Informationen über die Implikationen des Fallouts machen es erforderlich, das Thema greifbarer zu machen und es mit all seinen konkreten Chancen und Gefahren bewerten und beurteilen zu können. Die vorliegende Literatur konnte dies nur grob bewerkstelligen und schafft somit den Nährboden für Misstrauen und Verwirrung. Sozialwissenschaftliche Studien zeigten überdies, dass in wesentlichen Aspekten die Bevölkerung wenig bis kein Vertrauen in das SRM hat. Dieses Misstrauen richtet sich teilweise sogar an die Regierungen als Quelle von Informationen sowie an die Wissenschaft, deren Unvermögen, Auswirkungen im Vorfeld identifizieren zu können, befürchtet wird. Je nach Region stehen Bevölkerungen außerdem neuen Technologien eher skeptisch gegenüber.

Ein frühes Einbeziehen der Bevölkerung wird als ratsam angesehen, um den wissenschaftlichen Prozess nicht vom gesellschaftlichen Prozess zu entkoppeln. Eine Eigendynamik konnte sich durch eine solche Entkopplung bereits zeigen, da eine beträchtliche Anzahl an Menschen von der Durchführung von SAI überzeugt ist.

Die Wissenschaft hat sich der Tatsache, SAI könne bereits großflächig angewendet werden, bisher nicht angenommen und keine eigenen Messungen auf diesen Verdacht hin durchgeführt (Kapitel 5.1.2). Stattdessen wird verlautbart, dass keine Notwendigkeit und keine wissenschaftliche Grundlage bestehe, nach den Parametern zu suchen, die für Skepsis sorgen könnte.

Die Absicht, die mit dieser Thesis verfolgt wurde, ist den derzeitigen Kenntnisstand zu SAI vorzulegen. Dieser Wissensstand kann zu diesem Zeitpunkt nicht ausschließlich anhand wissenschaftlicher Studien erfolgen, da sich dort mit der o.g. Thematik nicht ernsthaft auseinandergesetzt wurde und der Besorgnis der Bürger daher nicht ausreichend Rechnung getragen kann. Zu dieser Thematik gehört z. B. die Investigation nach Stoffen, denen durch öffentlichen Druck in Form von Anfragen an Abgeordnete oder sowohl deutschland- als auch

europaweiter Petitionen bereits ausreichend Legitimation zukam. Diese Lücken wurden unter Zuhilfenahme von Experten im jeweiligen respektiven Feld zu schließen versucht, um somit einen realitätsbezogenen Überblick über den derzeitigen Kenntnisstand zu erreichen (Kapitel 5.2.2).

In den USA hat die Initiative *GeoengineeringWatch* bereits mit einem Team von Anwälten rechtliche Schritte gegen amerikanische Behörden eingeleitet mit der Forderung, die verdeckten SAI-Maßnahmen zu stoppen. Aufsehen scheint es vor allem im Bundesstaat Kalifornien zu geben, in dem bereits Bürgerversammlungen zum Thema Geoengineering stattfanden. Zudem äußerten sich Ex-Militär-Mitarbeiter, Neurobiologen und Politiker zu Wort, die größtenteils mit eigens gesammelten Indizien wie Blutproben oder Analysen frei aufgefangenen Regenwassers, Schnee oder Sediment bestätigen können, dass die Anwendung von aerosolbasiertem CE (SAI) bereits durchgeführt wird. Diese Überzeugung wird vor allem dadurch genährt, dass die gemessenen Werte mit den z. T. bereits seit Jahrzehnten existenten Patenten und den vorgeschlagenen Stoffen Aluminium und Barium in einen Kontext gebracht werden.

In den Ausführungen wurde überdies die Möglichkeit des Missbrauchs deutlich, dass vor dem Hintergrund fehlender rechtlich anwendbarer Regelwerke und durch die verhältnismäßig geringen Kosten, die diese Maßnahmen mit sich bringen, das Schelling-Kriterium erfüllt wird (Kapitel 4.3.2). Die Analyse zeigt zudem, dass derzeit keine politischen Instrumente existieren, die SRM/SAI völkerrechtlich zu definieren oder reglementieren vermögen.

Eine Ergänzung dazu ist, dass Futures Märkte von kontrollierbaren Wetterverhältnissen beeinflusst werden können und somit potenziell ein kalkuliertes Interesse seitens der Investoren in die Technologie vorliegt. Bei einer Voraussage über das zukünftige Wettergeschehen würde ein unfairer Vorteil auf den Derivatmärkten die Folge sein. In den ökonomischen Aspekten der Studien wurde dieser Punkt nicht adressiert.

6.4 Das Wetter als Waffe

Die Gefahr, dass das Wetter als Waffe verwendet werden könnte, wurde lediglich in Randnotizen erwähnt. Es gibt zwar ein Abkommen, das den Einsatz von Wettermodifikation zur feindlichen Nutzung untersagt, es ist aber nicht auf den Tatbestand des CE zutreffend (Kapitel 4.3.1.4). Bereits im Jahre 1996 forderte die US Air Force in ihrem Gedankenexperiment „Weather as a force multiplier – owning the weather in 2025“ die Erforschung von Wettermodifikation zur Nutzung als Waffe. Dass *Operation Popeye* und *Project Stormfury* bereits militärische Versuche waren, Wetter sowohl als Waffe als auch als volkswirtschaftliche Maßnahme zu nutzen, findet ebenfalls lediglich am Rande Erwähnung. Die Tatsache, dass Forschung bereits in den 1970er Jahren durch ein Gesetz zu koordinieren ersucht wurde, findet in den Publikationen keinerlei Erwähnung.

Das Interesse der CIA sowie die Involvierung der US Air Force lassen vermuten, dass das Interesse darüber, wie man das Klima zu kontrollieren vermag, nicht ausschließlich auf die Abkühlung des Planeten abgezielt sein muss.

7 Schlussfolgerung

„Hinsichtlich welcher Aspekte des SRM besteht Forschungsbedarf?“ ist die erste formulierte Forschungsfrage. Die Analyse hat gezeigt, dass besonders im Bereich Modellierung große Unsicherheiten bestehen. Vor allem in den Unsicherheiten, die sich auf die Niederschlagsverteilung und die aerosolbedingte Dynamik in der Stratosphäre beziehen, sind Erkenntnisse nötig, um ansatzweise gesicherte Aussagen darüber zulassen zu können, welches Ausmaß der Einsatz von SAI erreichen könnte. Zudem sind die Rückkopplungsmechanismen, die sich auf ökologische Systeme ergeben könnten, nicht bekannt. Hier herrscht Forschungsbedarf.

Die nach vorn schreitenden Forschungsinstitute haben bisher noch keine gesicherten Antworten auf diese offenen Fragen liefern können und es ist fraglich, dass vor dem Hintergrund der komplexen Wirkweise des Klimas (vgl. Kapitel 2.1.3) überhaupt solche Antworten möglich sind. Die unzureichend prognostizierbaren Auswirkungen und Nebenwirkungen von SAI sind die wohl wichtigsten Faktoren bei der Bewertung der Technologie, weshalb deren Erforschung besonders große Bedeutung zukommen muss. Dem Austausch von Stoffen zwischen Stratos- und Troposphäre sowie der möglichen Entstehung von Dürren, die lediglich von Alan Robock hinreichend Erwähnung findet, kommt hierbei ein besonderes Augenmerk zu. Außerdem sind den unzureichend dargestellten Auswirkungen auf die Boden- sowie die Wasserqualität und im Besonderen den Auswirkungen auf das Schutzgut Mensch Rechnung zu tragen.

Der bisherige Forschungsfortschritt ist zwischen den forschenden Institutionen unabgestimmt. Dies zeigt sich auch in der Unkenntnis der Bevölkerungen derjenigen Länder, in denen Forschung zum SAI hauptsächlich stattfindet – dazu gehören im Besonderen die USA, Großbritannien und Deutschland. Die Schaffung eines öffentlichen Diskurs sollte zeitnah avisiert werden, damit Kenntnis über die möglicherweise z. T. angewendete oder bevorstehende Maßnahme zur Beeinflussung des Strahlungshaushaltes entsteht und die Chance eingeräumt werden kann, den (Gedanken-)Experimenten frühzeitig Einhalt gebieten zu können. Dies führt zwangsläufig zur Betrachtung der nächsten Forschungsfrage.

„Findet die Anwendung des SRM bereits statt?“ stellte die zweite Forschungsfrage dieser Bachelorarbeit dar und lässt sich anhand der in dieser Bachelorarbeit gesammelten Fakten und Hinweise nicht abschließend beantworten, da keine wissenschaftlichen Befunde dafür erbracht wurden. Bisher wurde zu den dargebrachten Indizien, die eine Verbindung zwischen den zusammengetragenen Fakten und einer möglichen bereits stattfindenden Anwendung von SAI, erkennen lassen, kein Gegenbeweis erbracht. Führende Institute wie die NASA, das Met Office, das DLR, die lufthygienische Überwachung des Landes Niedersachsen oder das Umweltbundesamt mit seinem eigenen Luftmessnetz haben selbst zwar keine Messdaten erhoben, jedoch wird auf sie Bezug genommen, wenn das Umweltbundesamt, die niedersächsische Landesregierung o.ä. verdeutlichen möchten, dass derartige Programme nicht stattfinden. Andererseits gibt es auch keine wissenschaftlich anerkannten Beweise, die dafür sprechen, dass SAI bereits durchgeführt wird.

Der Einsatz von Düppel in den vergangenen Jahren kann allerdings als Beispiel eines eindeutigen Indizes dafür gewertet werden, dass ohne das Mitwissen der Bevölkerung Partikel in die Atmosphäre ausgebracht wurden.

Die fehlende kritische Auseinandersetzung mit der Überzeugung, dass geheime Programme bereits durchgeführt werden könnten, ist auffallend. Ein Diskurs und eine Debatte darüber würde dem Anliegen Kreditabilität verschaffen. Bisherige Studien sind dahingehend vom Begriff „Chemtrails“ belegt worden, welches nicht das eigentliche Anliegen adressierten. Anstatt den Begriff SAI zu nennen, wie ihn die Wissenschaft verwendet, wurden bei Shearer et al. (2016), Mercer et al. (2011) und der Niedersächsische[n] Landesregierung (17. Wahlperiode) (2016) möglicherweise stattfindende Einsätze von CE mit dem Begriff „Chemtrails“ beantwortet. Eine Internetsuche nach diesem Begriff führt teilweise auf Internetseiten, die vehement behaupten, dass dieses Phänomen stattfindet und keinerlei glaubwürdige Daten dazu bereitstellen. Die Fehlinformation, die dort zu finden ist, lässt einen derzeitigen Einsatz unglaublich und unbegründet erscheinen.

Dennoch ist festzuhalten, dass die wissenschaftliche Literatur es in den letzten 15 Jahren – seit die Anzahl an Publikationen zum SRM gestiegen ist – versäumt hat über, den Fallout der angedachten Partikel zu referieren, was womöglich die Tatsache begünstigte, dass der wissenschaftliche Stand des SAI mit der „Chemtrail“-Idee vermischt wurde und sich somit ein Eigenleben entwickeln konnte, welches nicht wissenschaftlich belegt ist. Eine Parallele zu bisherigen Verdachtsmomenten könnte sich möglicherweise auftun, wenn a) der Begriff „Chemtrail“ durch Climate Engineering oder Stratospheric Aerosol Injection ersetzt und b) die tatsächlichen Auswirkungen des vorgeschlagenen Aluminium und Barium und/oder Sulfat tatsächlich in Studien untersucht würden, anstatt lediglich zu beschreiben, dass die Partikel für 1-2 Jahre (Schwefel) und bis zu 10 Jahre (Aluminiumpartikel in Nanometergröße) in der Stratosphäre verweilen können.

Verbunden mit der ersten Forschungsfrage lässt sich hier konkludierend festhalten, dass hinsichtlich Aluminium, Barium und Sulfaten zusätzliche Anstrengungen vorgenommen werden sollten, um die Inhaltsstoffe der persistenten Kondensstreifen zu prüfen. Dies würde dem Verdacht, es handle sich um geheime Experimente, entweder die Grundlage entziehen oder bereits durchgeführte Programme bestätigen können. Daher sind nun Behörden und öffentliche Institutionen in der Bringschuld, die Kontroverse aufzulösen und mit der Aufwendung eines voraussichtlich fünfstelligen (Euro-)Betrages für eigene Messungen Klarheit darüber zu schaffen, ob SAI bereits angewendet wird oder nicht. Dies könnte im kleineren Rahmen außerdem Gegenstand einer weiteren Abschlussarbeit sein.

8 Literaturverzeichnis

Abegglen, Manuel; Brem, B. T.; Ellenrieder, M.; Durdina, L.; Rindlisbacher, T.; Wang, J. et al. (2016): Chemical characterization of freshly emitted particulate matter from aircraft exhaust using single particle mass spectrometry. In: *Atmospheric Environment* 134, S. 181–197. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2016.03.051.

Bahn, Steffen (05.08.16): Aluminium- und Bariumwerte in der Luft. Staatliches Gewerbeaufsichtsamt Hildesheim, 05.08.16. Telefonnotiz.

Bala, G.; Duffy, P. B.; Taylor, K. E. (2008): Impact of geoengineering schemes on the global hydrological cycle. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 105 (22), S. 7664–7669. DOI: 10.1073/pnas.0711648105.

Benduhn, F.; Lawrence, M. G. (2013): An investigation of the role of sedimentation for stratospheric solar radiation management. In: *J. Geophys. Res. Atmos.* 118 (14), S. 7905–7921. DOI: 10.1002/jgrd.50622.

Beringer, Tim Dr.; Betz, Gregor Prof. Dr.; Boucher, Olivier Dr.; Boysen, Lena; Carrier, Martin Prof. Dr.; Goeschl, Timo Prof., PhD et al. (2014): Modellierung in der Climate Engineering Forschung. Aussagekräftig trotz Unsicherheiten. Schwerpunktprogramm 1689 der Deutschen Forschungsgemeinschaft. Hg. v. Kiel Earth Institute. Deutsche Forschungsgemeinschaft. Kiel. Online verfügbar unter http://www.spp-climate-engineering.de/modellierung.html?file=files/ce-projekt/media/download_PDFs/Modellierung_in_der_CE_Forschung.pdf, zuletzt geprüft am 29.08.2016.

Betz, Gregor; Cacean, Sebastian (2011): *Climate Engineering: Ethische Aspekte*. Berlin, zuletzt geprüft am 11.08.2016.

Blaylock, Russell L. (2012): Aluminum Induced Immunoexcitotoxicity in Neurodevelopmental and Neurodegenerative Disorders. In: *CIC* 2 (1), S. 46–53. DOI: 10.2174/1877944111202010046.

Borick, Christopher; Rabe, Barry (2012): Americans Cool on Geoengineering. Approaches to Addressing Climate Change. In: *Issues in Governance Studies* (46). Online verfügbar unter <http://www.brookings.edu/~media/Research/Files/Papers/2012/5/30-geo-engineering-rabe-borick/30-geo-engineering-rabe-borick.pdf>, zuletzt geprüft am 08.08.16

Brennan, John O. (2016): John Brennan on Transnational Threats to Global Security. Council On Foreign Relations. Online verfügbar unter <http://www.cfr.org/intelligence/john-brennan-transnational-threats-global-security/p38082>, zuletzt aktualisiert am 05.07.2016, zuletzt geprüft am 15.08.2016.

Bronson, Diana; Mooney, Pat; Wetter, Kathy Jo (2009): Retooling the Planet? Climate Chaos in the Geoengineering Age. A report prepared by the ETC Group. Unter Mitarbeit von Jim Thomas, Silvia Ribeiro, Elenita Dano und Niclas Hällström. Hg. v. Swedish Society for Nature Conservation. Stockholm (9055). Online verfügbar unter http://www.etcgroup.org/sites/www.etcgroup.org/files/publication/pdf_file/Retooling%20the%20Planet%201.2.pdf, zuletzt geprüft am 11.08.2016.

Cairns, Rose (2014): Climates of suspicion: 'chemtrail' conspiracy narratives and the international politics of geoengineering. Climate Geoengineering Governance Working Paper Series: 009. Online verfügbar unter <http://www.geoengineering-governance-research.org/perch/resources/workingpaper9cairnsclimatesofsuspicion.pdf>, zuletzt geprüft am 08.08.2016.

Chang, David B.; Shih, I-Fu (1990): Patent US5003186 - Stratospheric Welsbach seeding for reduction of global warming am 23.04.1990.

Daniel, John (2011): NOAA study: Increase in particles high in Earth's atmosphere has offset some recent climate warming. Hg. v. NOAA. Earth System Research Laboratory. Online verfügbar unter http://www.noaanews.noaa.gov/stories2011/20110721_particles.html, zuletzt geprüft am 27.08.2016.

Der Brockhaus. In fünfzehn Bänden (2002). Unter Mitarbeit von Marianne Strzysch-Siebeck. 2., durchges. u. aktualisierte Aufl. Leipzig u.a.: Brockhaus.

Deutscher Bundestag (16. Wahlperiode) (2009): Antwort der Bundesregierung auf die kleine Anfrage der Abgeordneten Eva Bulling-Schröter, Lutz Heilmann, Hans-Kurt Hill, Dr. Petra Sitte und der Fraktion DIE LINKE. Drucksache 16/12178. Ungewöhnliche atmosphärische Strukturen im Radarbild. Online verfügbar unter <http://dip21.bundestag.de/dip21/btd/16/121/1612178.pdf>, zuletzt geprüft am 23.07.2016.

Deutscher Bundestag (17. Wahlperiode) (2012): Antwort der Bundesregierung auf die Kleine Anfrage der Abgeordneten René Röspel, Dr. Ernst Dieter Rossmann, Oliver Kaczmarek, weiterer Abgeordneter und der Fraktion der SPD-. Drucksache 17/9943. Geoengineering/Climate-Engineering. Online verfügbar unter <http://dip21.bundestag.de/dip21/btd/17/103/1710311.pdf>, zuletzt geprüft am 02.07.2016.

Duden. Das große Wörterbuch der deutschen Sprache; in zehn Bänden (1999). Unter Mitarbeit von Werner Scholze-Stubenrecht. 3., völlig neu bearbeitete und erweiterte Auflage. Mannheim, Leipzig, Wien, Zürich: Dudenverlag.

Dykema, J. A.; Keith, D. W.; Anderson, J. G.; Weisenstein, D. (2014): Stratospheric controlled perturbation experiment. A small-scale experiment to improve understanding of the risks of solar geoengineering. In: *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 372 (2031). DOI: 10.1098/rsta.2014.0059.

Effiong, Utibe; Neitzel, Richard L. (2016): Assessing the direct occupational and public health impacts of solar radiation management with stratospheric aerosols. In: *Environmental health : a global access science source* 15, S. 7. DOI: 10.1186/s12940-016-0089-0.

ETC Group (2010a): Open Letter to the Climate Response Fund and the Scientific Organizing Committee of the Asilomar Conference on Climate Intervention. Online verfügbar unter http://www.etcgroup.org/files/publication/pdf_file/AsilomarENG190310.pdf, zuletzt geprüft am 23.07.2016.

ETC Group (2010b): Geopiracy: The Case against Geoengineering (103). Online verfügbar unter <http://www.etcgroup.org/content/geopiracy-case-against-geoengineering>, zuletzt geprüft am 23.07.2016.

ETC Group (2012): The World of Geoengineering. ETC Group Maps Earth System Experimentation. ETC Group. Online verfügbar unter <http://www.etcgroup.org/content/world-geoengineering>, zuletzt aktualisiert am 27.08.2016, zuletzt geprüft am 27.08.2016.

European Parliament (2014 - 2019) - Committee on Petitions (2016): Notice to Members. European Parliament. Online verfügbar unter <http://www.europarl.europa.eu/sides/getDoc.do?type=COMPARL&reference=PE-582.346&format=PDF&language=EN&secondRef=01>, zuletzt geprüft am 26.08.2016.

Fischedick, Manfred; Görner, Klaus; Thomeczek, Margit (Hg.) (2015): CO₂: Abtrennung, Speicherung, Nutzung. Ganzheitliche Bewertung im Bereich von Energiewirtschaft und Industrie. Berlin: Springer Vieweg.

GeoEngineeringWatch.org (Regie) (2014): Geoengineering Investigation Demanded By Numerous Experts. YouTube-Video. Online verfügbar unter <https://www.youtube.com/watch?v=O4WhYKP83zo#t=24m25s>, zuletzt geprüft am 20.08.16.

Gibbs, Wayt (2009): The Stratospheric Shield. A practical, low-cost way to reverse catastrophic warming of the Arctic - or the entire planet. Online verfügbar unter http://www.intellectualventureslab.com/assets_lab/Stratoshield-white-paper-300dpi.pdf, zuletzt geprüft am 25.07.2016.

Grundwald, Armin (2010): Der Einsatz steigt. In: Jacob Radloff (Hg.): Geo-Engineering. Notwendiger Plan B gegen den Klimawandel? München: Oekom-Verl. (Politische Ökologie, 120), S. 37–39.

Gujer, Eric (2012): Klimawissenschaft: Sonnenschutz für die Erde. Hg. v. Neue Zürcher Zeitung. Neue Zürcher Zeitung AG. Schweiz. Online verfügbar unter <http://www.nzz.ch/wissen/wissenschaft/sonnenschutz-fuer-die-erde-1.17282213>, zuletzt aktualisiert am 27.06.2012, zuletzt geprüft am 17.08.2016.

Hamilton, Clive (2013): No, we should not just 'at least do the research'. In: *Nature* 496 (7444), S. 139. DOI: 10.1038/496139a.

Matthias Hancke (Regie) (2015): Overcast. Klimaexperimente am Himmel. DVD. Schweiz: Dedal Films.

Harrison, Roy; Hester, Ron (Hg.) (2014): Geoengineering of the Climate System. Cambridge: Royal Society of Chemistry (Issues in environmental science and technology).

Hauser, Walter (Hg.) (2002): Klima. Das Experiment mit dem Planeten Erde ; [Sonderausstellung des Deutschen Museums, Zentrum Neue Technologien, vom 7.11.2002 bis 15.6.2003]. Zentrum Neue Technologien; Sonderausstellung des Deutschen Museums, Zentrum Neue Technologien. Buchhandelsausg. Stuttgart: Theiss.

Heintzenberg, Jost (ca. 2011): Chancen und Risiken von Climate Engineering zur Beeinflussung der Erderwärmung. Naturwissenschaftliche und technische Aspekte. Leipzig, Hannover: Leibniz-Inst. für Troposphärenforschung; Technische Informationsbibliothek u. Universitätsbibliothek. Online verfügbar unter <http://edok01.tib.uni-hannover.de/edoks/e01fb11/679971866.pdf>, zuletzt geprüft am 14.08.16.

Herndon, J. Marvin (2015): Aluminum poisoning of humanity and Earth's biota by clandestine geoengineering activity: Implications for India. In: *Current Science* 108 (12). Online verfügbar unter <http://www.currentscience.ac.in/Volumes/108/12/2173.pdf>, zuletzt geprüft am 23.08.2016.

Hucko, Mark (2008): Patent US20090032214 - System and Method of Control of the Terrestrial Climate and its Protection against Warming and Climatic Catastrophes Caused by Warming such as Hurricanes am 02.06.2008.

IAGP (2014): Public and other Stakeholder Perceptions of Geoengineering. Facilitating responsible innovation. Online verfügbar unter http://www.iagp.ac.uk/sites/default/files/IAGP_Briefing_Note_2.pdf, zuletzt geprüft am 24.07.2016.

IPCC (Hg.) (2012): IPCC Expert Meeting on Geoengineering. Meeting Report. Unter Mitarbeit von Ottmar Edenhofer, Ramon Pichs-Madruga, Youba Sokona, Christopher Field, Vicente Barros, Thomas F. Stocker et al. Online verfügbar unter https://www.ipcc.ch/pdf/supporting-material/EM_GeoE_Meeting_Report_final.pdf, zuletzt geprüft am 24.07.16.

IPCC (2013): Annex III: Glossary. [Planton, S. (ed.)]. In: IPCC (Hg.): Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Unter Mitarbeit von T. F. Stocker, D. Qin, M. Tignor G.-K. Plattner, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels et al. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, zuletzt geprüft am 04.09.2016.

IPCC (Hg.) (2013): Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Unter Mitarbeit von T. F. Stocker, D. Qin, M. Tignor G.-K. Plattner, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels et al. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press.

Ittershagen, Martin (2016): Prozessdetails: Flugzeug-Passagiere-international-DE-2020. Hg. v. BMUB. Umweltbundesamt. Online verfügbar unter <http://www.probas.umweltbundesamt.de/php/prozessdetails.php?id={8D9901A7-382F-4AAD-8027-0B6A53A71540}>, zuletzt geprüft am 03.09.2016.

Izrael, Yu. A.; Zakharov, V. M.; Petrov, N. N.; Ryaboshapko, A. G.; Ivanov, V. N.; Savchenko, A. V. et al. (2009): Field studies of a geo-engineering method of maintaining a modern climate with aerosol particles. In: *Russ. Meteorol. Hydrol.* 34 (10), S. 635–638. DOI: 10.3103/S106837390910001X.

Jamieson, D. (1996): Ethics and intentional climate change. *Climate Change*, S. 323–336. Online verfügbar unter <http://wiki.umt.edu/odccss/images/1/1f/Jamison.pdf>, zuletzt geprüft am 05.07.2016.

Jigyasu, Dharmendra Kumar; Kuvar, Rohit; Srivastava, Nupur; Singh, Sandeep; Singh, Indra Bir; Singh, Munendra (2014): High mobility of aluminium in Gomati River Basin: implications to human health. In: *Current Science* 108 (3). Online verfügbar unter <http://www.currentscience.ac.in/Volumes/108/03/0434.pdf>, zuletzt geprüft am 23.08.2016.

Jones, Andy; Haywood, Jim M.; Alterskjaer, Kari; Boucher, Olivier; Cole, Jason N. S.; Curry, Charles L. et al. (2013): The impact of abrupt suspension of solar radiation management (termination effect) in experiment G2 of the Geoengineering Model Intercomparison Project (GeoMIP). In: *J. Geophys. Res. Atmos.* 118 (17), S. 9743–9752. DOI: 10.1002/jgrd.50762.

Keith, David W. (1998): Geoengineering. An article for the Encyclopedia of Global Change to be published by Oxford University Press in February, 2000. Online verfügbar unter <http://keith.seas.harvard.edu/papers/44.Keith.2002.GeoengOxfordEncy.f.pdf>, zuletzt geprüft am 05.07.2016.

Keith, David W. (2002): Geoengineering - die technologische Gestaltung des Planeten Erde. In: Walter Hauser (Hg.): Klima. Das Experiment mit dem Planeten Erde ; [Sonderausstellung des Deutschen Museums, Zentrum Neue Technologien, vom 7.11.2002 bis 15.6.2003]. Buchhandelsausg. Stuttgart: Theiss, S. 352–369. Online verfügbar unter <http://keith.seas.harvard.edu/papers/50.Keith.2002.DeutscheMuseum.s.pdf>., zuletzt geprüft am 05.07.2016.

Keith, David W. (2010): Photophoretic levitation of engineered aerosols for geoengineering. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 107 (38), S. 16428–16431. DOI: 10.1073/pnas.1009519107.

Keith, David W.; Parson, Edward; Morgan, M. Granger (2010): Research on global sun block needed now. In: *Nature* 463 (7280), S. 426–427. DOI: 10.1038/463426a.

Kiel Earth Institute (Hg.) (2011): Climate Engineering. Wirtschaftliche Aspekte. Unter Mitarbeit von Gernot Klepper und Wilfried Rickels. Kiel. Online verfügbar unter <http://www.kiel-earth-institute.de/sondierungsstudie-climate-engineering.html>, zuletzt geprüft am 15.08.2016.

Kleidon, A.; Renner, M. (2013): A simple explanation for the sensitivity of the hydrologic cycle to surface temperature and solar radiation and its implications for global climate change. In: *Earth Syst. Dynam.* 4 (2), S. 455–465. DOI: 10.5194/esd-4-455-2013.

Klinghardt, Dietrich (2014): Dr. med. Dietrich Klinghardt - Schwermetalle, Impfungen & Entgiftung. SPIRIT OF HEALTH - Kongress für alternative Heilmedizin (Regie). YouTube-Video. Online verfügbar unter <https://www.youtube.com/watch?v=1kxqfE2VfD8#t=46m00s>, zuletzt geprüft am 27.08.16.

Klose, Brigitte (2016): Meteorologie. Eine interdisziplinäre Einführung in die Physik der Atmosphäre. 3. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

Kuo, Kirsty (2012): Geoengineering trial cancelled: more regulation needed. University of Cambridge. Online verfügbar unter <http://theconversation.com/geoengineering-trial-cancelled-more-regulation-needed-7297>, zuletzt geprüft am 20.07.2016.

Lenton, Timothy M.; Held, Hermann; Kriegler, Elmar; Hall, Jim W.; Lucht, Wolfgang; Rahmstorf, Stefan; Schellnhuber, Hans Joachim (2008): Tipping elements in the Earth's climate system. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 105 (6), S. 1786–1793. DOI: 10.1073/pnas.0705414105.

Lohmann, Ulrike (2010): Der Sonne entgegen. In: Jacob Radloff (Hg.): Geo-Engineering. Notwendiger Plan B gegen den Klimawandel? München: Oekom-Verl. (Politische Ökologie, 120), S. 23–26.

Long, Chuck (2015): Accidental Geoengineering? Airline traffic may help create an icy haze that's brightening U.S. skies. Hg. v. NOAA. Earth Systems Research Laboratory. Online verfügbar unter <http://www.esrl.noaa.gov/news/2015/121515.html>, zuletzt aktualisiert am 19.07.2016, zuletzt geprüft am 26.08.2016.

Loria, Kevin (2015): 'One of the largest human experiments in history' was conducted on unsuspecting residents of San Francisco. Online verfügbar unter <http://uk.businessinsider.com/the-military-tested-bacterial-weapons-in-san-francisco-2015-7?IR=T>, zuletzt aktualisiert am 09.07.2015, zuletzt geprüft am 16.07.2016.

Lunt, Dan J. (2010): Developing Geoengineering Research at Bristol workshop - University of Bristol. Hg. v. University of Bristol. Online verfügbar unter [http://research-information.bristol.ac.uk/en/projects/developing-geoengineering-research-at-bristol-workshop\(d1f43f1c-f830-418e-8adf-d6a678ad51c4\).html](http://research-information.bristol.ac.uk/en/projects/developing-geoengineering-research-at-bristol-workshop(d1f43f1c-f830-418e-8adf-d6a678ad51c4).html), zuletzt geprüft am 20.07.2016.

Macnaghten, Phil; Szerszynski, Bronislaw (2013): Living the global social experiment. An analysis of public discourse on solar radiation management and its implications for governance. In: *Global Environmental Change* 23 (2), S. 465–474. DOI: 10.1016/j.gloenvcha.2012.12.008.

Malberg, Horst (2007): Meteorologie und Klimatologie. Eine Einführung. Fünfte, erweiterte und aktualisierte Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg. Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-37222-6>.

Matthews, H. Damon; Caldeira, Ken (2007): Transient climate-carbon simulations of planetary geoengineering. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 104 (24), S. 9949–9954. DOI: 10.1073/pnas.0700419104.

Meghan, Kristen (2013): I am who I claim to be... Kristen Meghan (Regie). YouTube-Video. Online verfügbar unter <https://www.youtube.com/watch?v=9x-u7H6kEGM>, zuletzt geprüft am 26.08.16.

Meghan, Kristen (2014): Geoengineering Whistleblower ~ Ex-Military ~ Kristen Meghan, Hauppauge, NY, January 18th, 2014. Weitere Beteiligte: DianeDi. John F. King (Regie). YouTube-Video. Online verfügbar unter <https://www.youtube.com/watch?v=jHm0XhtDyZA#t=10m10s>, zuletzt geprüft am 26.08.16.

Mercado, Lina M.; Bellouin, Nicolas; Sitch, Stephen; Boucher, Olivier; Huntingford, Chris; Wild, Martin; Cox, Peter M. (2009): Impact of changes in diffuse radiation on the global land carbon sink. In: *Nature* 458 (7241), S. 1014–1017. DOI: 10.1038/nature07949.

Mercer, A. M.; Keith, D. W.; Sharp, J. D. (2011): Public understanding of solar radiation management. In: *Environ. Res. Lett.* 6 (4). DOI: 10.1088/1748-9326/6/4/044006.

Met Office (2013): Geoengineering. Online verfügbar unter <http://www.metoffice.gov.uk/media/pdf/o/0/geoengineering.pdf>, zuletzt geprüft am 24.07.2016.

Michalsky, Oliver (2016): Ein CDU-Politiker auf der Suche nach Chemtrail-Giften. Hg. v. WeltN24 GmbH. Berlin. Online verfügbar unter <https://beta.welt.de/politik/deutschland/article156922814/Ein-CDU-Politiker-auf-der-Suche-nach-Chemtrail-Giften.html>, zuletzt aktualisiert am 09.07.2016, zuletzt geprüft am 31.08.2016.

National Academy of Sciences (1991): Policy Implications of Greenhouse Warming. Unter Mitarbeit von National Academy of Engineering und Institute of Medicine. Washington: National Academies Press. Online verfügbar unter <http://www.nap.edu/catalog/1794.html>, zuletzt geprüft am 27.07.16.

Niedersächsischer Landtag (17. Wahlperiode) (2016): Kleine Anfrage zur schriftlichen Beantwortung mit Antwort der Landesregierung. Drucksache 17/5996. Wie sind die Auswirkungen von "Geo-Engineering" in Niedersachsen? Online verfügbar unter <http://www.landtag-niedersachsen.de/Drucksachen/Drucksachen%5F17%5F7500/5501-6000/17-5996.pdf?page=2>, zuletzt geprüft am 05.08.2016.

Nowack, Peer Johannes; Abraham, Nathan Luke; Braesicke, Peter; Pyle, John Adrian (2016): Stratospheric ozone changes under solar geoengineering. Implications for UV exposure and air quality. In: *Atmos. Chem. Phys.* 16 (6), S. 4191–4203. DOI: 10.5194/acp-16-4191-2016.

Oldham, P.; Szerszynski, B.; Stilgoe, J.; Brown, C.; Eacott, B.; Yuille, A. (2014): Mapping the landscape of climate engineering. In: *Philosophical transactions. Series A, Mathematical, physical, and engineering sciences* 372 (2031). DOI: 10.1098/rsta.2014.0065.

Oschlies, Andreas Prof. Dr. (2014): Die Rolle der Modellierung in der Climate Engineering-Forschung. In: Kiel Earth Institute (Hg.): Modellierung in der Climate Engineering Forschung. Aussagekräftig trotz Unsicherheiten. Schwerpunktprogramm 1689 der Deutschen Forschungsgemeinschaft. Deutsche Forschungsgemeinschaft. Kiel, S. 3–5. Online verfügbar unter http://www.spp-climate-engineering.de/modellierung.html?file=files/ce-projekt/media/download_PDFs/Modellierung_in_der_CE_Forschung.pdf, zuletzt geprüft am 29.08.16.

Osterhage, Wolfgang (2016): Climate Engineering. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.

Ott, Konrad (2010): Die letzte Versuchung. In: Jacob Radloff (Hg.): Geo-Engineering. Notwendiger Plan B gegen den Klimawandel? München: Oekom-Verl. (Politische Ökologie, 120), S. 40–43.

Oxford University (2016): Oxford Geoengineering Programme // Oxford Principles of Geoengineering. Online verfügbar unter <http://www.geoengineering.ox.ac.uk/oxford-principles/principles/>, zuletzt geprüft am 22.07.2016.

Pachauri, R. K.; Mayer, Leo; IPCC SYR TSU (Hg.) (2015): Climate change 2014. Synthesis report. Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva, Switzerland: Intergovernmental Panel on Climate Change. Online verfügbar unter https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/SYR_AR5_FINAL_full_wcover.pdf, zuletzt geprüft am 17.08.2016.

Papee, Henry M.; Montefinale, Alberto C.; Petriconi, Gianna L.; Zawidzky, Tadeusz W. (1977): Patent USRE29142 - Combustible compositions for generating aerosols, particularly suitable for cloud modification and weather control and aerosolization process. Unter Mitarbeit von Henry M. Papee, Alberto C. Montefinale, Gianna L. Petriconi, Tadeusz W. Zawidzky und Consiglio Nazionale Delle Richerche.

parlamentwatch e.V. (2013): [abgeordnetenwatch.de](http://www.abgeordnetenwatch.de): Werner Schulz (DIE GRÜNEN). Online verfügbar unter http://www.abgeordnetenwatch.de/werner_schulz-901-22782--f382067.html#questions, zuletzt geprüft am 26.08.2016.

Pierce, Jeffrey R.; Weissenstein, Debra K.; Heckendorn, Patricia; Peter, Thomas; Keith, David W. (2010): Efficient formation of stratospheric aerosol for climate engineering by emission of condensable vapor from aircraft. In: *Geophys. Res. Lett.* 37 (18), n/a-n/a. DOI: 10.1029/2010GL043975.

Planungsamt der Bundeswehr - Dezernat Zukunftsanalyse (2012): Streitkräfte, Fähigkeiten und Technologien im 21. Jahrhundert. Future Topic Geoengineering. Online verfügbar unter <http://www.planungsamt.bundeswehr.de/resource/resource/MzEzNTM4MmUzMzMzMmMzMzMzZTM2MzIzMDMwMzAzMDMwMzAzMDY4NzE2NmMzMzk3YTc5NjYyMDIwMjAyMDIw/Future%20Topic%20Geoengineering.pdf>, zuletzt geprüft am 01.07.2016.

Pomrehn, Wolfgang (2010): Der Planet und die Chemotherapie. In: Jacob Radloff (Hg.): Geo-Engineering. Notwendiger Plan B gegen den Klimawandel? München: Oekom-Verl. (Politische Ökologie, 120), S. 11–14.

Proelß, Alexander; Güssow, Kerstin (2011): Climate Engineering. Instrumente und Institutionen des internationalen Rechts. Trier. Online verfügbar unter <http://www.kiel-earth-institute.de/sondierungsstudie-climate-engineering/articles/sondierungsstudie-climate-engineering-25.html>, zuletzt geprüft am 14.08.16.

Public Employees for Environmental Responsibility (2015): Weather Service Employees tethered by illegal gag orders. Special Counsel Asked to Reverse Recent Raft of Blanket Non-disclosure Policies. PEER. Online verfügbar unter <http://www.peer.org/news/news-releases/weather-service-employees-tethered-by-illegal-gag-orders.html>, zuletzt geprüft am 07.09.2016.

Radloff, Jacob (Hg.) (2010): Geo-Engineering. Notwendiger Plan B gegen den Klimawandel? München: Oekom-Verl. (Politische Ökologie, 120).

Rasch, Philip J.; Latham, John; Chen, Chih-Chieh (2009): Geoengineering by cloud seeding. Influence on sea ice and climate system. In: *Environ. Res. Lett.* 4 (4), S. 3. DOI: 10.1088/1748-9326/4/4/045112.

Rayner, Steve; Heyward, Clare; Kruger, Tim; Pidgeon, Nick; Redgwell, Catherine; Savulescu, Julian (2013): The Oxford Principles. Climate Geoengineering Governance Working Paper Series No. 1. Online verfügbar unter <http://www.geoengineering-governance-research.org/perch/resources/workingpaper1rayneretaltheoxfordprinciples.pdf>, zuletzt geprüft am 23.07.16.

Reising, Laurence A. (1990): Patent US5104069 - Apparatus and method for ejecting matter from an aircraft am 29.10.1990.

Renn, Ortwin; Brachatzek, Nadine; Hiller, Sylvia (2011): Climate Engineering: Risikowahrnehmung, gesellschaftliche Risikodiskurse und Optionen der Öffentlichkeitsbeteiligung. Online verfügbar unter <http://www.kiel-earth-institute.de/sondierungsstudie-climate-engineering.html?...&file=files/media/downloads/risikowahrnehmung.pdf>, zuletzt geprüft am 07.08.16.

Rickels, Wilfried; Klepper, Gernot; Dovern, Jonas (Hg.) (ca. 2011): Gezielte Eingriffe in das Klima? Eine Bestandsaufnahme der Debatte zu Climate Engineering. Unter Mitarbeit von Gregor Betz, Nadine Brachatzek, Sebastian Cacean, Kerstin Güssow, Jost Heintzenberg, Sylvia Hiller et al. Kiel Earth Institute. Kiel, Hannover: Technische Informationsbibliothek u. Universitätsbibliothek. Online verfügbar unter <http://edok01.tib.uni-hannover.de/edoks/e01fb12/68354182X.pdf>, zuletzt geprüft am 19.09.16.

Robock, Alan (2008): 20 reasons why geoengineering may be a bad idea. In: *Bulletin of the Atomic Scientists* 64 (2), S. 14–18. DOI: 10.2968/064002006.

Robock, Alan (2014): CHAPTER 7. Stratospheric Aerosol Geoengineering. In: Roy Harrison und Ron Hester (Hg.): *Geoengineering of the Climate System*. Cambridge: Royal Society of Chemistry (Issues in environmental science and technology), S. 162–185. Online verfügbar unter <http://climate.envsci.rutgers.edu/pdf/RobockStratAerosolGeo.pdf>, zuletzt geprüft am 02.08.16.

Robock, Alan (2015): Cloud control. Climatologist Alan Robock on the effects of geoengineering and nuclear war. In: *Bulletin of the Atomic Scientists* 71 (3), S. 1–7. DOI: 10.1177/0096340215581353.

Robock, Alan; Bunzl, Martin; Kravitz, Ben; Stenchikov, Georgiy L. (2010): A Test for Geoengineering? In: *Science* Vol. 327 (No. 5965), S. 530–531. Online verfügbar unter <http://climate.envsci.rutgers.edu/pdf/TestForGeoengineeringScience2010.pdf>, zuletzt geprüft am 29.08.16.

Robock, Alan; Mao, Jianping (1995): The Volcanic Signal in Surface Temperature Observations. In: *J. Climate* 8 (5), S. 1086–1103. DOI: 10.1175/1520-0442(1995)008<1086:TVSIST>2.0.CO;2.

Robock, Alan; Marquardt, Allison; Kravitz, Ben; Stenchikov, Georgiy (2009): Benefits, risks, and costs of stratospheric geoengineering. In: *Geophys. Res. Lett.* 36 (19). DOI: 10.1029/2009GL039209.

Robock, Alan; Oman, Luke; Stenchikov, Georgiy L. (2008): Regional climate responses to geoengineering with tropical and Arctic SO₂ injections. In: *J. Geophys. Res.* 113 (D16). DOI: 10.1029/2008JD010050.

Roedel, Walter; Wagner, Thomas (2011): Physik unserer Umwelt. Die Atmosphäre. 4. Aufl., 1. korrigierter Nachdr. Berlin: Springer.

Roth, Y; Chapnik, JS; Cole, P (2003): Feasibility of aerosol vaccination in humans. - PubMed - NCBI. National Center for Biotechnology Information. Online verfügbar unter <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/12656420>, zuletzt geprüft am 16.07.2016.

Royal Society (2009): Geoengineering the climate. Science, governance and uncertainty. London: Royal Society (RS policy document, 10/09). Online verfügbar unter https://royalsociety.org/~media/Royal_Society_Content/policy/publications/2009/8693.pdf, zuletzt geprüft am 10.09.2016.

Sample, Ian (2015): Spy agencies fund climate research in hunt for weather weapon, scientist fears. the guardian. Online verfügbar unter <https://www.theguardian.com/environment/2015/feb/15/spy-agencies-fund-climate-research-weather-weapon-claim>, zuletzt geprüft am 26.07.2016.

Schmidt, Hauke; Niemeier, Ulrike; Timmreck, Claudia; Aaheim, Asbjorn; Romstad, Bard; Wei, Taoyuan et al. (2012): The FP7 Project IMPLICC. Implications and risks of engineering solar radiation to limit climate change. Final publishable summary report. IMPLICC. Online verfügbar unter http://implicc.zmaw.de/fileadmin/user_upload/implicc/other_documents/implicc_final_report_20121130_publishable_summary.pdf, zuletzt geprüft am 25.07.2016.

Schulz, Werner (2013): „Grüner“ Werner Schulz (M.E.P.) sagt, daß Geoengineering am Himmel bereits angewendet wird! Werner Altnickel (Regie). YouTube-Video. Online verfügbar unter <https://www.youtube.com/watch?v=HIOMH97aciM#t=4m0s>, zuletzt geprüft am 26.08.16.

Shasta County Board of Supervisors (2014): Agenda. Regular Meeting of the board of Supervisors. Online verfügbar unter <http://www.co.shasta.ca.us/docs/BOS/2014-agendas/agn2014-07-15.pdf?sfvrsn=2>, zuletzt geprüft am 03.08.2016.

Shearer, Christine; West, Mick; Caldeira, Ken; Davis, Steven J. (2016): Quantifying expert consensus against the existence of a secret, large-scale atmospheric spraying program. In: *Environ. Res. Lett.* 11 (8), S. 84011. DOI: 10.1088/1748-9326/11/8/084011.

Siewert, Elke (2016): Datenanfrage zur Erstellung einer Bachelorarbeit. Staatliches Gewerbeaufsichtsamt Hildesheim, 09.08.2016. E-Mail Verkehr mit Frau Siewert.

Singarayer, Joy S.; Ridgwell, Andy; Irvine, Peter (2009): Assessing the benefits of crop albedo bio-geoengineering. In: *Environ. Res. Lett.* 4 (4), S. 45110. DOI: 10.1088/1748-9326/4/4/045110.

Smolczyk, Ulrich (Hg.) (1996): Grundbau-Taschenbuch. 5. Aufl. Berlin: Ernst.

SPICE (2016): Evaluating Candidate Particles | SPICE. Unter Mitarbeit von School of Earth Sciences. University of Bristol. Online verfügbar unter <http://www.spice.ac.uk/project/evaluating-candidate-particles/>, zuletzt geprüft am 29.07.2016.

SRMGI (2012): Solar radiation management. The governance of research. [Great Britain]: SRMGI. Online verfügbar unter <http://www.srmgi.org/files/2016/02/SRMGI.pdf>, zuletzt geprüft am 19.09.2016.

State of Rhode Island: An Act Relating to Health and Safety -- Geoengineering. H 7578. Online verfügbar unter <http://webserver.rilin.state.ri.us/BillText16/HouseText16/H7578.pdf>, zuletzt geprüft am 03.08.2016.

Tamzy, House J.; Near, James B., Jr.; Shields, William B.; Celentano, Ronald J.; Husband, David M.; Mercer, Ann E.; Pugh, James E. (Hg.) (1996): Weather as a Force Multiplier: Owning the Weather in 2025. Department of Defense. Online verfügbar unter <http://www.au.af.mil/au/awc/csat/2025/volume3/vol3ch15.pdf>, zuletzt geprüft am 19.09.2016.

The Asilomar Conference (2010): Recommendations on Principles for Research into Climate Engineering Techniques. Conference Report. Online verfügbar unter <http://www.geoengineeringwatch.org/documents/AsilomarConferenceReport.pdf>, zuletzt geprüft am 23.07.2016.

Umweltbundesamt (2011a): Geo-Engineering - wirksamer Klimaschutz oder Größenwahn? [Methoden, rechtliche Rahmenbedingungen, umweltpolitische Forderungen]. Unter Mitarbeit von Harald Ginzky, Friederike Herrmann, Karin Kartschall, Wera Leujak, Kai Lipsius, Claudia Mäder et al. Stand: April 2011. Dessau-Roßlau.

Umweltbundesamt (2011b): Chemtrails - Gefährliche Experimente mit der Atmosphäre oder bloße Fiktion? Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/3574.pdf>, zuletzt geprüft am 09.08.2016.

Umweltbundesamt (Hg.) (2016a): Geo-Engineering. Untersuchung und Bewertung von Methoden zum Geo-Engineering, die die Zusammensetzung der Atmosphäre beeinflussen. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/geo-engineering>, zuletzt geprüft am 19.09.2016.

Umweltbundesamt (2016b): Vom Umweltbundesamt beantworteter Fragenkatalog. Anfrage zum Geoengineering (SRM) im Rahmen einer Bachelorthesis. Dessau-Roßlau, 23.08.16. E-Mail Verkehr mit Frau Karin Kartschall & Herrn Felix Poetschke. Enthalten in Anlage A.

Umweltbundesamt (2016c): Feinstaub. Hg. v. Umweltbundesamt. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/themen/luft/luftschadstoffe/feinstaub>, zuletzt geprüft am 25.08.2016.

United Nations General Assembly (1977): Convention on the Prohibition of Military or Any Other Hostile Use of Environmental Modification Techniques - A/RES/31/72 Annex - UN Documents: Gathering a body of global agreements. Online verfügbar unter <http://www.un-documents.net/enmod.htm>, zuletzt aktualisiert am 31.03.2015, zuletzt geprüft am 16.07.2016.

United States Congress (94th) (1976): Public Law 94-490. An Act to authorize and direct the Secretary of Commerce to develop a national policy on weather modification, and for other purposes. United States Congress (94th). Online verfügbar unter <https://www.gpo.gov/fdsys/pkg/STATUTE-90/pdf/STATUTE-90-Pg2359.pdf>, zuletzt geprüft am 27.07.2016.

United States Congress (95th) - Committee on Commerce, Science and Transportation (1978): Weather modification : programs, problems, policy, and potential. prepared at the request of Howard W. Cannon, Chairman. Online verfügbar unter <http://ufdc.ufl.edu/AA00025909/00001/3x>, zuletzt geprüft am 27.07.2016.

Verband Deutscher Ingenieure (VDI) (2015): VDI 2267, Blatt 3. Stoffbestimmung an Partikeln in der Außenluft. Hg. v. Beuth Verlag. Verein Deutscher Ingenieure (VDI). Düsseldorf.

Wagner, Andrew; Bleckmann, Charles; England, E (2001): In Vitro Toxicity of Aluminum Nanoparticles in Rat Alveolar Macrophages. Final Report for the Period June 1993 to March 2001 - 20060403509. Unter Mitarbeit von Krista Hess, Saber Hussain und John J. Schlager. Hg. v. Air Force Research Laboratory (AFRL-HE-WP-TP-2006-0022). Online verfügbar unter <handle.dtic.mil/100.2/ADA445568>, zuletzt geprüft am 04.08.2016.

Weis, Alois (2012): Aluminiumwerte im Rahmen unserer „bundesweiten Regenwasseraktion“. Online verfügbar unter <http://www.sauberer-himmel.de/2012/12/08/aluminiumwerte-im-rahmen-unserer-bundesweiten-regenwasseraktion/>, zuletzt geprüft am 09.08.2016.

Weisenstein, D. K.; Keith, D. W.; Dykema, J. A. (2015): Solar geoengineering using solid aerosol in the stratosphere. In: *Atmos. Chem. Phys.* 15 (20), S. 11835–11859. DOI: 10.5194/acp-15-11835-2015.

Wiertz, Thilo; Reichwein, David (2010): Climate Engineering zwischen Klimapolitik und Völkerrecht. Status quo und Perspektiven. In: *KIT-Technikfolgenabschätzung: Theorie und Praxis* 19 (2), S. 17–24. Online verfügbar unter http://www2.geog.uni-heidelberg.de/media/personen/wiertz_geoengineering_klimapolitik.pdf, zuletzt geprüft am 14.08.2016.

Wigington, Dane (2016a): Anti-Geoengineering Legal Alliance Files US 60 Day Notice Of Legal Action. GeoEngineeringWatch. Online verfügbar unter <http://www.geoengineeringwatch.org/category/legal-action/>, zuletzt geprüft am 27.08.16.

Wigington, Dane (2016b): Rainwater Tests. Hg. v. GeoEngineeringWatch. Online verfügbar unter <http://www.geoengineeringwatch.org/water-tests/>, zuletzt geprüft am 23.08.16.

Wild, Martin; Gilgen, Hans; Roesch, Andres; Ohmura, Atsumu; Long, Charles N.; Dutton, Ellsworth G. et al. (2005): From Dimming to Brightening: Decadal Changes in Solar Radiation at Earth's Surface. In: *Science (New York, N. Y.)* 308 (5723), S. 847–850. DOI: 10.1126/science.1109213.

World Meteorological Organization (2007): Executive Summary of the WMO statement on weather modification (Appendix C). Online verfügbar unter http://www.wmo.int/pages/prog/arep/wwrp/new/documents/WM_statement_guidelines_approved.pdf, zuletzt geprüft am 27.07.2016.

Zürn, Michael; Schäfer, Stefan (2011): Climate Engineering. Internationale Beziehungen und politische Regulierung. Berlin. Online verfügbar unter <http://www.kiel-earth-institute.de/sondierungsstudie-climate-engineering.html>, zuletzt geprüft am 15.08.16.

Anhang A.

Vom Umweltbundesamt beantworteter Fragenkatalog.

- 1.) *Die kleine Anfrage vom umweltpolitischen Sprecher Herrn Martin Bäumer an den Landtag Niedersachsen [1] (S. 1) bezüglich des Geoengineerings erwähnt 20fach erhöhte (ggü. Trinkwasser) Aluminiumwerte in frei aufgefangenem Regenwasser. Wie kann ein solch erhöhter Wert erklärt werden?*

Die uns vorliegenden Konzentrationen von Aluminium in Niederschlagswasser geben nur eine sehr grobe Orientierung. Sie stammen z. T. aus den 1990er Jahren, z. T. aus halbquantitativen Messungen (QuickScan ICP/MS) aktueller Niederschlagsproben aus unserem Luftmessnetz und liegen an den Hintergrundstationen des UBA-Luftmessnetzes größtenteils deutlich unter 0,2 mg/L.

Konzentrationen von Aluminium in Grundwasser liegen in Abhängigkeit von der geologischen Beschaffenheit des Aquifers unter 0,1 mg/L, meist sogar unter 0,01 mg/L. Da Trinkwasser in Deutschland überwiegend aus Grundwasser gewonnen wird, dürften dies auch die Konzentrationsbereiche in Trinkwasser sein.

- 2.) *Kommt Aluminium in reiner Form oder seinen Verbindungen in der Luft vor (z. B. durch Industrieabgase oder AKW-Emissionen)?*

Analysen auf Aluminium finden meist mit Labormethoden statt, die keinen Hinweis auf vorliegende Spezies geben. Eine solche Methode ist die ICP-MS (Plasmamassenspektrometrie), welche die Summe von Aluminium aus allen Verbindungsformen in einer Probe misst. Es darf angenommen werden, dass der größte Anteil von Aluminium in der Luft in aufgewirbelten mineralischen Staubpartikeln vorliegt. Aluminium ist das dritthäufigste Element in der Erdkruste und in sehr vielen Mineralen enthalten, z. B. in Feldspäten oder Tonmineralen.

- 3.) *Gibt es beim UBA Messgeräte, die Aluminium(-verbindungen) in Luft oder Regenwasser nachweisen können?*

Ja, das Luftmessnetz des UBA betreibt eine ICP-MS (oben angesprochen). Hiermit werden Schwermetalle in Proben von Niederschlagswasser und aufgeschlossenem Feinstaub gemessen. Das Gerät liefert zwar ein „halbquantitatives“ Aluminium-Signal (QuickScan-Modus), das allerdings nicht weiter ausgewertet wird, da Aluminium für die von uns bearbeiteten Fragestellungen ohne Relevanz ist (vgl. Frage 1).

- 4.) *Wenn ja, welche Kleinstpartikelgröße kann mit den Messgeräten erfasst werden und welche Konzentrationen lagen in entsprechenden Messungen vor?*

Die Partikelgröße spielt weniger bei der Analyse im Labor, als vielmehr bei der Proben-sammlung eine Rolle. Je feiner die Partikel sind, desto geringer ist ihre Masse. Es wird somit immer aufwändiger eine genügend große Menge Partikel für die Analyse im Labor zu sammeln. Wir sammeln und analysieren Partikel der Fraktion PM10 (< 10 µm) auf Filtern. Die

gesammelten Partikel müssen für die Analyse zunächst aufgeschlossen (= in Lösung gebracht) werden. Die im UBA-Luftmessnetz eingesetzte Methode liefert jedoch keinen vollständigen Aufschluss des Aluminiumgehalts der Filterprobe.

In der Richtlinie VDI 2267, Blatt 3 sind jedoch typische Massenkonzentrationsbereiche von Aluminium als Bestandteil der PM₁₀-Fraktion angegeben. Diese liegen im ländlichen Gebiet bei 10 bis 500 ng/m³ und im städtischen Gebiet bei 10 bis 1000 ng/m³.

5.) *Im UBA-Hintergrundpapier "Geoengineering - wirksamer Klimaschutz oder Größenwahn?" werden als mögliche Inhaltsstoffe der Aerosole Aluminiumschnipsel und Sulfataerosole erwähnt. Keith (2010) [2] schlägt Aluminiumpartikel in Nanometergröße vor. Weiterer Bestandteil ist Bariumtitanat (BaTiO₃). Wird derzeit BaTiO₃ oder Barium(-verbindungen) im Luftmessnetz oder in Regenwasseranalysen erfasst?*

Ausschließlich mit halbquantitativen Messungen (QuickScan ICP/MS)

Wenn ja, welche Konzentrationen liegen vor und welche Partikelgröße können die Messgeräte erfassen?

Die uns vorliegenden Konzentrationen von Barium in Niederschlagswasser geben nur eine sehr grobe Orientierung. Sie stammen ausschließlich aus halbquantitativen Messungen (QuickScan ICP/MS) aktueller Niederschlagsproben aus unserem Luftmessnetz und liegen an den Hintergrundstationen des UBA-Luftmessnetzes größtenteils deutlich unter 0,01 mg/L. In der Richtlinie VDI 2267, Blatt 3 sind typische Massenkonzentrationsbereiche von Barium als Bestandteil der PM₁₀-Fraktion angegeben. Diese liegen im ländlichen Gebiet bis 5 ng/m³ und im städtischen Gebiet bei 10 bis 50 ng/m³.

Wenn nein, aus welchem Grund?

Die vorgeschlagene Ausbringung von Aluminiumpartikeln oder Bariumverbindungen ist eine rein theoretische Möglichkeit zur Beeinflussung des globalen Strahlungshaushalts. Zu einer praktischen Umsetzung wird es nicht kommen, da es eine Reihe von Vorbehalten gibt. Es besteht daher kein Grund, die Konzentrationen von Aluminium und Barium in der Außenluft langfristig zu beobachten.

6.) *Ist dem UBA bekannt, ob die Bundeswehr Barium & Strontium im Luftmessnetz oder im Regenwasser misst?*

Bitte fragen Sie bei der Bundeswehr nach.

7.) *Weshalb liegt für Barium kein Grenzwert in der Trinkwasserverordnung vor?*

Die Auswahl der in der Trinkwasserverordnung mit Parameterwerten geregelten Stoffe basiert weitgehend auf der Auswahl der EU Trinkwasserrichtlinie. Diese wurde bei der Überarbeitung 1998 stark reduziert, da man festgestellt hatte, dass die zunächst auch aus dem Abwasser- und Umweltrecht übernommenen Stoffe längst nicht alle für Trinkwasser relevant sind (vermutlich genügte ihre Regelung „an der Quelle“, so dass sie im Rohwasser zur Trinkwassergewinnung nicht in relevanten Konzentrationen vorkommen). Auch heute ist zutreffend, dass für fast alle der in der Trinkwasserverordnung geregelten Stoffe die Grenzwerte zu über 99% der Proben eingehalten sind. Eine Verunreinigung mit Barium ist daher sehr

unwahrscheinlich. Träte Barium in einem Trinkwasser auf und müsste toxikologisch bewertet werden, so kann der WHO-Leitwert für Trinkwasser von 700 µg/L herangezogen werden.

8.) *Welcher Kenntnisstand liegt dem UBA zum sogenannten Fallout - der Fracht, die durch die Schwerkraft oder Regen in die Troposphäre und auf die Erdoberfläche gelangt - bei der Ausbringung von Aerosolen in die Stratosphäre, vor?*

Der stoffliche Austausch zwischen der stabil geschichteten und sehr trockenen Stratosphäre und der Troposphäre findet sehr langsam statt. Die Tropopause wirkt als Barriere.

Bei starken Vulkanausbrüchen können Stoffe in die Stratosphäre gelangen oder sich dort aus Vulkanemissionen bilden, die den Strahlungshaushalt beeinflussen (z. B. Sulfat-Aerosole). Diese können dort mehrere Jahre verweilen.

9.) *Wie sieht das Umweltbundesamt die Auswirkungen auf die Boden- / Luft- & Wasserqualität durch die Einwirkung von Sulfat- und/oder Aluminiumaerosolen?*

Sulfat führt zur Versauerung des Niederschlagswassers („saurer Regen“). Saurer Regen war in den 1970er/1980er Jahren ein Problem. Oberflächengewässer wurden zunehmend sauer mit Folgen für die Ökosysteme, saures Sickerwasser mobilisierte im Untergrund Schwermetalle, Nährstoffe und Aluminium. Das führte zu Waldschäden („Waldsterben“) oder Problemen bei der Trinkwassergewinnung (z. B. Verockerung von Brunnen). Die Entschwefelung der Rauchgase von Großfeuerungsanlagen führt seit 1980 zu einer stetigen und bis heute sehr deutlichen Reduktion der Schwefelemissionen. Sulfat im Niederschlagswasser ist heute kein nennenswertes Problem mehr für Boden, Luft und Gewässer.

Aluminiumhaltige Aerosole stellten weder in der Vergangenheit noch stellen sie heute ein Problem für Boden, Luft und Gewässer dar.

10.) *Welche Auswirkungen auf den Menschen könnten Aluminiumpartikel in Nanometergröße durch die Aufnahme über Schleimhäute, Respiration oder Aufnahme über die Haut haben?*

Für Aluminium in Form von Aluminium(III)-Ionen ist bekannt, dass es sowohl über die Schleimhäute des Magendarmtraktes als auch über die Schleimhäute der Lunge aufgenommen werden kann (maximale Arbeitsplatzkonzentration für die alveolengängige Fraktion Aluminiumoxid und -hydroxid haltiger Stäube: 1,5 mg/m³), sich in verschiedenen Organsystemen des Menschen verteilt und bei Überdosierung zu schädlichen Wirkungen auf das Nervensystem, die Fortpflanzung und die Knochenentwicklung führen kann.

Dagegen bestehen zu nanoskaligen Aluminiumoxid-Partikeln sowohl bezüglich der Aufnahme und als auch bezüglich der Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit Wissenslücken und Unsicherheiten.

Für Nanopartikel allgemein gilt, dass bei Einatmung die Lunge das Zielorgan ist. Je kleiner die Partikel sind, desto tiefer dringen sie in die Lunge ein. Für Aluminiumoxid-Nanopartikel gibt es aus Zellkulturversuchen Hinweise für eine toxische Wirkung auf die Lunge^{1,2}. Inwieweit diese in-vitro-Wirkungen allerdings auf die in-vivo-Situation übertragbar sind, ist bisher nicht bekannt.

Neben den Schleimhäuten des Magendarmtraktes und der Lunge kann Aluminium auch über die Haut aufgenommen werden. Laut einem UMID-Artikel aus dem Jahr 2015 (UMID 1-2015, Epp et al.) besteht derzeit aber wissenschaftliche Unsicherheit hinsichtlich der tatsächlichen Penetrationsrate und der Langzeitfolgen chronischer Aluminiumexposition über die Haut.

1 Li, X. et al. Integrative functional transcriptomic analyses implicate specific molecular pathways in pulmonary toxicity from exposure to aluminum oxide nanoparticles. *Nanotoxicology*. 10 (7), 957-969, doi:10.3109/17435390.2016.1149632, (2016).

2 Li, X. et al. An acetyl-L-carnitine switch on mitochondrial dysfunction and rescue in the metabolomics study on aluminum oxide nanoparticles. *Part Fibre Toxicol*. 13 4, doi:10.1186/s12989-016-0115-y, (2016).

11.) *Teilt das Umweltbundesamt immer noch die Ansicht des Schweizer Bundesamtes für Zivilluftfahrt vom März 2011 [3], dass es unwahrscheinlich sei, dass Sprüheinsätze von Flugzeugen im Rahmen des Solar Radiation Managements stattfinden?*

Das Umweltbundesamt ist den Behauptungen hinsichtlich der Existenz geheimer Projekte zur Ausbringung von Chemikalien in die Atmosphäre in verschiedene Richtungen nachgegangen. Weder beim Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), beim Deutschen Wetterdienst (DWD) noch der Deutschen Flugsicherung GmbH gab es Hinweise auf derartige Prozesse. Insgesamt hat sich gezeigt, dass es keinerlei wissenschaftliche Belege oder Indizien auf derartige Einsätze gibt. Seither liegen dem Umweltbundesamt keine neuen Erkenntnisse dazu vor, so dass sich an der Einschätzung des Umweltbundesamtes, wie beschrieben:

<https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/3574.pdf>, nichts geändert hat.

Im Rahmen der Diskussion zum Geoengineering existieren Vorschläge zum Solar Radiation Management, die so durch die Beeinflussung des Strahlungshaushaltes der globalen Erwärmung entgegen wirken wollen, ohne dabei jedoch die Ursachen zu beeinflussen.

Derartige Verfahren beeinflussen jedoch nicht die Ursachen der globalen Erwärmung. Sie ändern nichts an der Tatsache, dass Treibhausgase in die Atmosphäre emittiert werden und deren Konzentrationen weiter ansteigen. Schwerwiegende ökologische Folgeprobleme wie die Ozeanversauerung und damit anhaltende Folgen für Pflanzen- und Tierwelt im Ozean bleiben bestehen.

Derartige theoretische Vorschläge sind bisher kaum mit Forschungsergebnissen unterlegt. Unabhängig von der Einschätzung ihrer möglichen Wirksamkeit und Kosten, sind auch Nebenwirkungen und Risiken, die mit dem Einsatz derartiger Methoden verbunden wären, nicht bekannt und nicht kalkulierbar. Eine praktische Erprobung käme einem Großexperiment mit nicht einschätzbarem Ausgang gleich. Derartige Experimente finden nach Kenntnis des Umweltbundesamtes in Deutschland nicht auch nicht statt.

Anhang B.

E-Mails.

Betreff **AW: Datenanfrage zur Erstellung einer Bachelorarbeit**
Von Siewert, Elke <Elke.Siewert@gaa-hi.niedersachsen.de>
An frank.fleischer@stud.h-da.de <frank.fleischer@stud.h-da.de>
Günther, Werner, Dr. <werner.guenther@gaa-hi.Niedersachsen.de>, Kullick, Stefan <Stefan.Kullick@gaa-hi.niedersachsen.de>, Hainsch, Andreas, Dr. <Andreas.Hainsch@gaa-hi.Niedersachsen.de>
Kopie
Datum 9.8.2016 08:11 AM



Sehr geehrter Herr Fleischer,

Ihre Anfrage nach Daten zur Luftqualität in Niedersachsen wurde an mich weiter geleitet. Wir sind in unserem Bereich unter anderem zuständig sind für die Analyse der Filter aus den stationären PM10-Messgeräten. Leider muss ich Ihnen mitteilen, dass wir routinemäßig die Elemente Aluminium, Barium und Strontium nicht quantitativ erfassen und Ihnen somit keine Daten für Niedersachsen zur Verfügung stellen können. Ansonsten hätten wir die Daten gerne zusammengestellt.

Mit freundlichen Grüßen

Im Auftrage

Elke Siewert

*Dipl.-Min. Elke Siewert
Staatliches Gewerbeaufsichtsamt Hildesheim
Goslarsche Str. 3, 31134 Hildesheim
Abteilung 4 - Zentrale Unterstützungsstelle Luftreinhaltung, Lärm und Gefahrstoffe (ZUS LLG)-
Tel: 05121/509-408 (Labor)
Fax: 05121/509-290
Mail: elke.siewert@gaa-hi.niedersachsen.de
Dienstgebäude: An der Scharlake 39, 31135 Hildesheim*

Abbildung B.1.: E-Mail von Frau Siewert vom 09.08.2016

Betreff **Anfrage zum Geoengineering (SRM) im Rahmen einer Bachelorthesis**

Von <frank.fleischer@stud.h-da.de>

An <karin.kartschall@uba.de>

Datum 5.8.2016 02:41 PM



Guten Tag Frau Kartschall,

im Rahmen meiner Bachelorthesis, die eine Analyse zum Stand der Wissenschaft im Hinblick auf Geoengineeringmaßnahmen zur Beeinflussung des Strahlungshaushaltes vornimmt, habe ich, wie bereits in unserem Telefonat am Mittwoch besprochen, einige Fragen, die ich in Form eines kleinen Fragenkataloges Ihnen im folgenden vorliegen:

- 1.) Die kleine Anfrage vom umweltpolitischen Sprecher Herrn Martin Bäumer an den Landtag Niedersachsen [1] (S. 1) bezüglich des Geoengineerings erwähnt 20fach erhöhte (ggü. Trinkwasser) Aluminiumwerte in frei aufgefangenem Regenwasser. Wie kann ein solch erhöhter Wert erklärt werden?
- 2.) Kommt Aluminium in reiner Form oder seinen Verbindungen in der Luft vor (z.B. durch Industrieabgase oder AKW-Emissionen)?
- 3.) Gibt es beim UBA Messgeräte, die Aluminium(-verbindungen) in Luft oder Regenwasser nachweisen können?
- 4.) Wenn ja, welche Kleinstpartikelgröße kann mit den Messgeräten erfasst werden und welche Konzentrationen lagen in entsprechenden Messungen vor?
- 5.) Im UBA-Hintergrundpapier "Geoengineering - wirksamer Klimaschutz oder Größenwahn?" werden als mögliche Inhaltsstoffe der Aerosole Aluminiumschnipsel und Sulfataerosole erwähnt. Keith (2010) [2] schlägt Aluminiumpartikel in Nanometergröße vor. Weiterer Bestandteil ist Bariumtitanat (BaTiO_3). Wird derzeit BaTiO_3 oder Barium(-verbindungen) im Luftmessnetz oder in Regenwasseranalysen erfasst?
Wenn ja, welche Konzentrationen liegen vor und welche Partikelgröße können die Messgeräte erfassen?
Wenn nein, aus welchem Grund?
- 6.) Ist dem UBA bekannt, ob die Bundeswehr Barium & Strontium im Luftmessnetz oder im Regenwasser misst?
- 7.) Weshalb liegt für Barium kein Grenzwert in der Trinkwasserverordnung vor?
- 8.) Welcher Kenntnisstand liegt dem UBA zum sogenannten Fallout - der Fracht, die durch die Schwerkraft oder Regen in die Troposphäre und auf die Erdoberfläche gelangt - bei der Ausbringung von Aerosolen in die Stratosphäre, vor?
- 9.) Wie sieht das Umweltbundesamt die Auswirkungen auf die Boden- / Luft- & Wasserqualität durch die Einwirkung von Sulfat- und/oder Aluminiumaerosolen?
- 10.) Welche Auswirkungen auf den Menschen könnten Aluminiumpartikel in Nanometergröße durch die Aufnahme über Schleimhäute, Respiration oder Aufnahme über die Haut haben?

Abbildung B.2_1.: E-Mail von Frank Fleischer an Karin Kartschall vom 05.08. 2016 (1)

11.) Teilt das Umweltbundesamt immer noch die Ansicht des Schweizer Bundesamtes für Zivilluftfahrt vom März 2011 [3], dass es unwahrscheinlich sei, dass Sprüheinsätze von Flugzeugen im Rahmen des Solar Radiation Managements stattfinden?

Gerne können Sie mir die Antworten per Mail zusenden, wie von Ihnen gewünscht. Sind Sie einverstanden damit, dass ich mich bei Ihnen telefonisch melden kann, wenn einige Antworten eines näheren Eingehens meinerseits bedürfen?

Für Rückfragen stehe ich Ihnen per E-Mail oder telefonisch gerne zur Verfügung: 06 [REDACTED] oder 0157 - [REDACTED]

Mit freundlichen Grüßen,

Frank Fleischer

Quellen:

[1] <http://www.landtag-niedersachsen.de/Drucksachen/Drucksachen%5F17%5F7500/5501-6000/17-5996.pdf?page=2>

[2] <http://www.pnas.org/content/107/38/16428.abstract>

[3] <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/3574.pdf>

Abbildung B.2_2.: E-Mail von Frank Fleischer an Karin Kartschall vom 05.08. 2016 (2)

Betreff **Anfrage zum Geoengineering (SRM) im Rahmen
einer Bachelorthesis**

Von Poetschke, Felix <Felix.Poetschke@uba.de>

An frank.fleischer@stud.h-da.de <frank.fleischer@stud.h-da.de>

Datum 23.8.2016 04:07 PM



-
- Geoengineering.docx (19 KB)

Sehr geehrter Herr Fleischer,

im Anhang finden Sie unsere Antworten auf Ihre Fragen. Gerne können Sie sich bei weiteren Fragen erneut an uns wenden.

Mit freundlichen Grüßen
Felix Poetschke

Felix Poetschke
Pressesprecher

Referat „Presse- und
Öffentlichkeitsarbeit, Internet“

Umweltbundesamt
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau-Roßlau

Telefon: +49 (0)340 2103 2675
Mobil: +49 (0)173 723 5848
felix.poetschke@uba.de

Abbildung B.3.: E-Mail von Herrn Poetschke vom 23.08.2016