

# Climate Engineering – Solar Radiation Management zum Klimaschutz

## Bachelorarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades „Bachelor of Science (B.Sc.)“ im Studiengang  
Wirtschaftsingenieur der Fakultät Elektrotechnik und Informatik, Fakultät für Maschinenbau  
und der Wirtschaftswissenschaftlichen Fakultät der Leibniz Universität Hannover

vorgelegt von

Name: Hamel



Vorname: Fabian



Prüfer: Prof. Dr. Michael H. Breitner

Hannover, den 30.09.2020

# Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	III
Tabellenverzeichnis .....	IV
Abkürzungsverzeichnis.....	V
Abstrakt.....	VI
1. Einleitung.....	1
2. Grundlagen .....	3
2.1. Klimawandel – Aktueller Stand .....	3
2.2. Anthropogene Einflüsse auf das Klimasystem.....	5
2.2.1. Anthropogener Treibhausgaseneffekt.....	5
2.2.2. Mögliche Folgen einer weiter steigenden globalen Durchschnittstemperatur.....	5
2.2.3. Maßnahmen zur Reduzierung von Emissionen .....	7
2.3. Aerosole – Gegenspieler der Treibhausgase? .....	8
2.3.1. Definition Aerosole.....	8
2.3.2. Grundlegende Aerosolchemie.....	8
2.3.3. Einfluss der Aerosole auf das Klima .....	9
2.4. Ethische Aspekte .....	11
2.5. Politische Bewertungsgrundlage .....	11
3. Überblick über Climate Engineering-Maßnahmen.....	13
3.1. Carbon Dioxide Removal.....	13
3.1.1. Physikalische, marine Maßnahme .....	15
3.1.2. Chemische, marine Maßnahmen.....	15
3.1.3. Biologische, marine Maßnahme .....	16
3.1.4. Chemische, terrestrische Maßnahme .....	16
3.1.5. Biologische, terrestrische Maßnahmen.....	17
3.2. Radiation Management .....	18
3.3. Thermal Radiation Management.....	19
4. Solar Radiation Management-Maßnahmen .....	21
4.1. Reflektoren im Weltall.....	21
4.2. Albedo der Erdoberfläche .....	23
4.3. Modifikation mariner Schichtwolken.....	24
4.4. Stratosphärische Aerosol Injektion .....	25

4.5.	Vergleich der Potentiale der SRM-Maßnahmen .....	26
5.	Bewertung der Stratosphärische Aerosol Injektion .....	28
5.1.	Methodische Vorgehensweise .....	28
5.1.1.	Systematische Literaturrecherche .....	28
5.1.2.	Qualitative Experteninterviews .....	28
5.2.	Bewertung der technischen Realisierbarkeit .....	31
5.2.1.	Bewertung des Wirkpotentials .....	31
5.2.2.	Bewertung der Ausbringungsmethoden .....	32
5.2.3.	Bewertung der chemischen Realisierbarkeit .....	33
5.2.4.	Bewertung der physikalischen Realisierbarkeit .....	35
5.2.5.	Bewertung weiterer naturwissenschaftlicher Risiken .....	36
5.3.	Bewertung der ethischen Realisierbarkeit .....	37
5.4.	Bewertung der politischen Realisierbarkeit .....	39
5.5.	Zwischenfazit .....	41
6.	Realisationschancen und Handlungsempfehlung .....	43
6.1.	Kosten Kohlenstoffmanagementmaßnahmen .....	43
6.2.	Kostenvergleich mit SAI .....	44
6.3.	Realisationschancen .....	45
6.4.	Handlungsempfehlungen .....	46
7.	Limitationen .....	49
8.	Fazit und Ausblick .....	50
9.	Referenzen .....	51
10.	Anhang .....	VII
10.1.	Weitere Abbildungen .....	VII
10.2.	Fragenkatalog als Leitfaden für die Interviews .....	VIII
10.3.	Experteninterviews .....	VIII
	Ehrenwörtliche Erklärung .....	XLV

# 1. Einleitung

Die Menschheit steht vor einem globalen Problem, dem Klimawandel. Die Menschen sind derzeit abhängig von fossilen Energiequellen (Ming et al. 2014). Die Weltbevölkerung wächst und der Wunsch aller Menschen ein möglichst komfortables Leben zu führen ist groß (Süddeutsche Zeitung 2017).

Seit mehreren Jahrzehnten nimmt der Strahlungsantrieb kontinuierlich zu. Grund dafür ist größtenteils der anthropogene Treibhausgaseneffekt. Dieser verschiebt die Strahlungsbilanz der Erde. Die emittierten Treibhausgase lassen die einfallende Sonnenstrahlung passieren, die Erdoberfläche erwärmt sich und strahlt langwellige Wärmestrahlung zurück in das Weltall. Diese Strahlung wird durch die Eigenschaften der Treibhausgase teilweise absorbiert, weshalb die Temperatur der Atmosphäre und somit langfristig die globale Durchschnittstemperatur ansteigt. Der Treibhausgaseneffekt ist somit der zentrale Grund für die Änderungen innerhalb des Klimasystems (IPCC 2013).

Im Sonderbericht des Weltklimarates „Global Warming of 1,5 °C“ (IPCC 2018) wird davor gewarnt, dass ab einem durchschnittlichen Temperaturanstieg von 1,5 °C bis 2 °C sehr wahrscheinlich irreversible Kippunkte des Klimasystems überschritten werden. Da bereits eine Temperaturzunahme von mindestens 1 °C im Vergleich zum vorindustriellen Niveau zu beobachten ist (IPCC 2018), besteht nicht mehr viel Spielraum für ein Eingreifen.

Emissionsreduzierung und ein Umstieg auf erneuerbare Energiequellen stellen langfristig den richtigen Weg dar, kurz- und mittelfristig scheinen diese Maßnahmen aber nicht wirksam genug (Ming et al. 2014). Der Druck auf die Bevölkerung steigt, die Hilflosigkeit wächst. Es wird nach Lösungsmöglichkeiten gesucht.

Climate Engineering (CE), genauer Solar Radiation Management (SRM), könnte eine solche Möglichkeit darstellen. SRM umfasst mehrere Methoden und eine besonders vielversprechende, die Stratosphärische Aerosol Injektion (SAI), welche im Folgenden genauer betrachtet werden soll (Rickels et al. 2011). SRM beeinflusst die Strahlungsbilanz der Erde direkt, indem es die Reflektion kurzwelliger Strahlung erhöht. Dadurch könnte der Strahlungsantrieb und somit der Anstieg der globalen Durchschnittstemperatur schnell verringert werden.

Konkret soll SRM als kurz- bis mittelfristige Option gegen den Klimawandel kritisch gegen relevante andere Maßnahmen des Climate Engineering abwogen werden. Dazu werden die folgenden zwei Forschungsfragen verfolgt:

1. Welche technischen und ethischen Herausforderungen bringt SAI mit sich und ist es politisch realisierbar?
2. Wie viel kostet SAI im Vergleich zu anderen relevanten Emissionskontrollmaßnahmen und wie sind die Realisationschancen insgesamt?

Um diese Forschungsfragen beantworten zu können, wird methodisch zum einen normativ auf Basis relevanter Literaturbeiträge vorgegangen und zum anderen eine qualitative empirische Analyse über die Befragung von Experten relevanter Fachgebiete durchgeführt und ausgewertet. Beides wird zu einer kritischen Gesamteinschätzung zusammengeführt.

Inhaltlich werden zunächst die thematisch relevanten Grundlagen gelegt, indem der aktuelle Erkenntnisstand des Klimawandels kurz zusammengefasst wird. Im Anschluss wird der anthropogene Treibhausgasereffekt (THGE) kurz erklärt sowie die Folgen und die aktuell eingesetzten Gegenmaßnahmen skizziert. Dabei spielen Aerosole sowohl für das Klima als auch für fast alle Methoden des SRM eine wichtige Rolle, weshalb dieser Zusammenhang näher aufgezeigt werden soll. Anschließend wird der Begriff Ethik für den weiteren Verlauf der Forschungsarbeit definiert und eine politische Bewertungsgrundlage geschaffen. Im Kapitel „Überblick über Climate Engineering-Maßnahmen“ erfolgt die Betrachtung des Begriffs „Climate Engineering“ und ein Überblick über einzelne relevante Maßnahmen wird geboten, wobei die Auswahl auf Basis der Studie „Gezielte Eingriffe in das Klima? – Eine Bestandsaufnahme der Debatte zu Climate Engineering“ erfolgte (Rickels et al. 2011). Aufgrund der Relevanz von SRM werden die zu dieser Strategie zugehörigen Maßnahmen in einem separaten Kapitel beschrieben. Am Ende des Kapitels werden die erhofften Potentiale der SRM-Methoden miteinander verglichen und es kommt zu einem Zwischenfazit. Im Folgenden wird die Maßnahme SAI vorgestellt und die Herausforderungen aufgezeigt, wobei die technischen, ethischen und politischen Herausforderungen, die diese Maßnahme auslöst, betrachtet werden. Dabei erfolgt, nach einer Darstellung des Theorierahmens und der Methodik des Vorgehens, eine Bewertung der technischen, ethischen und politischen Herausforderungen unter Einbeziehung von relevanten Literaturmeinungen und Experteninterviews. Auf dieser Basis erfolgt eine genauere Auseinandersetzung mit den zu erwarteten Kosten der aktuell vorgeschlagenen Emissionsreduzierungsmaßnahmen im Vergleich zu SAI und eine Gesamteinschätzung der Realisationschancen. Abschließend werden die Handlungsempfehlungen formuliert. Den Abschluss der Ausarbeitung bildet zunächst eine Darstellung der Limitationen und dann ein Fazit mit Zusammenfassung und Ausblick.

## 8. Fazit und Ausblick

Diese Forschungsarbeit hat am Beispiel SAI untersucht, ob sich SRM zum Klimaschutz eignet. Im Zentrum der Forschung standen technische wie auch ethische und politische Herausforderungen und ein Vergleich der Kosten von herkömmlichen Kohlenstoffmanagementmaßnahmen und SAI. Die Daten wurden zum einen auf Basis einer systematischen Literaturrecherche erhoben, zum anderen durch qualitative Experteninterviews. Es ist ersichtlich geworden, dass SAI technisch realisierbar ist, ein Einsatz aber in nächster Zeit aufgrund unbekannter naturwissenschaftlicher Risiken und ethischer und politischer Herausforderungen kaum denkbar erscheint. Es könnte bspw. zu Änderungen im Niederschlagsmuster, es könnte vermehrt zu Wetterextremen und zu anderen noch unbekanntem Auswirkungen kommen. Aus ethischer Sicht stellen sich Fragen, ob SAI den nachfolgenden Generationen zumutbar ist und auch der aktuellen Generation, dies zu finanzieren, ob die Menschen in der Position sind einen solchen Eingriff vorzunehmen, wie ein Ausgleich für möglicherweise regional unterschiedliche Folgewirkungen von SAI aussehen könnte und ob ein Einsatz von SAI ethisch überhaupt gerechtfertigt werden kann. Auf der internationalen politischen Ebene ist CE, genauer SAI, noch kein Bestandteil der zu diskutierenden Aspekte und es hat sich dessen noch kein internationales Gremium angenommen, was, wie aufgezeigt wurde, durchaus einer politischen Rationalität entspricht, die es nur schwer zu brechen gilt. Wirtschaftlich, ebenso wie technisch, ist SAI jedoch umsetzbar. Im Kostenvergleich zu herkömmlichen Kohlenstoffmanagementmaßnahmen macht SAI nur einen Bruchteil der jährlichen Zahlungen für jene aus. In dieser Arbeit wird angenommen, dass Kohlenstoffmanagementmaßnahmen jährlich ungefähr 1502 Mrd. USD kosten, SAI hingegen kostet jährlich nur 83,8 Mrd. USD bis 90 Mrd. USD. Daher ist diese Maßnahme aus rein wirtschaftlicher Sicht sehr interessant.

Abschließend lässt sich sagen, dass SRM, genauer SAI, einen entscheidenden Beitrag für den Klimaschutz leisten könnte. Der positive Effekt dieser CE-Maßnahme wird derzeit noch durch negative und noch unbekanntem Auswirkungen geschmälert, jedoch könnte es sich zukünftig um eine valide Klimaschutzmaßnahme handeln, wenn diese näher erforscht wird. Damit SAI diesen Standpunkt erreichen kann, ist es nötig sich in folgenden Forschungsarbeiten spezifischer mit einzelnen Herausforderungen auseinanderzusetzen, bspw. bei der Entscheidung, welche Substanz als Aerosol verwendet werden sollte oder wie ein möglicher politischer Rahmen geschaffen werden könnte.