

# Climate Engineering - Herausforderungen und Maßnahmen des solaren Strahlungsmanagements

## Bachelorarbeit

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

vorgelegt von

Name: Friedrich



Vorname: Maren



Prüfer: Prof. Dr. M. H. Breitner

Hannover, 05.10.2021

# Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis .....	1
Abbildungsverzeichnis.....	3
Tabellenverzeichnis .....	4
Abkürzungsverzeichnis .....	5
Abstrakt .....	6
Einleitung.....	7
Motivation und Relevanz .....	7
Forschungsfragen .....	7
Methodisches Vorgehen .....	8
Grundlagen.....	10
Klimawandel – Status quo .....	10
Climate Engineering .....	11
Solar Radiation Management.....	13
Modifikation mariner Schichtwolken .....	15
Stratosphärische Aerosol Injektion .....	16
Erklärung .....	16
Risiken .....	18
Politischer Rahmen innerhalb internationaler Governance .....	20
Notwendigkeit.....	20
Problemstruktur der SRM-Maßnahmen .....	22
Verträge und Konventionen .....	22
Prinzipien.....	25
Nationale, internationale und nicht staatliche Governance .....	26
Aufgaben und Ziele.....	27
Herausforderungen und Bewältigungsstrategien .....	29
Zwischenfazit.....	31
Internationale Regimestruktur.....	32
Unilateralismus.....	32
Minilateralismus.....	32
Multilateralismus.....	33
Haftungsregime .....	37
Einbeziehung der Öffentlichkeit.....	39

Technischer Regulierungsmechanismus .....	41
Methoden zur Risikoverminderung.....	41
Risiken vorbeugen mithilfe von Simulation.....	41
Beeinflussung Lebenszeit SO <sub>2</sub> .....	46
Möglichkeit nachträglicher Anpassungen .....	48
Counter-Geoengineering.....	48
Gefahren eines Abbruchs der Maßnahmen .....	49
Limitation .....	51
Fazit und Ausblick.....	52
Quellenverzeichnis .....	53

# Einleitung

## Motivation und Relevanz

Die anthropogene globale Erwärmung und eine Reihe nachfolgender Veränderungen des Klimasystems bedrohen die Erde. Die Auswirkungen lassen sich zunehmend beobachten, so schmilzt das Meereis, Hitzewellen, Hurrikans und Pandemien nehmen zu. Die Erderwärmung ist längst keine weit entfernte Gefahr mehr, die wir ignorieren können, sondern die nicht umgängliche Realität. Es geht nicht mehr ausschließlich um das Ansteigen des Meeresspiegels, die Ursache des Klimawandels oder das Artensterben, sondern um eine Dynamik an Folgen, die die Existenz von hunderten Millionen Menschen gefährdet (vgl. Cavicchioli et al., 2019)

2015 wurde das Pariser Klimaabkommen verabschiedet, indem ermahnt wird, dass die Erde sich bis Ende des Jahrhunderts nicht mehr als 2 °C im Vergleich zum vorindustriellen Niveau erwärmen darf. Mittlerweile wirkt dieses Zwei-Grad-Ziel wie ein Best-Case-Szenario (vgl. Raftery et al., 2017). Der neuste Sachstandsbericht des Weltklimarats (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) spricht von der „Alarmstufe Rot für die Menschheit“ und prognostiziert eine Erwärmung von bis zu 3 °C bei geplanten Minderungsmaßnahmen (IPCC, 2021). Es fehlt an konkreten Maßnahmen zum Erreichen des Ziels und unser Denken und Handeln ist zu langsam. Treibhausgase (THG) müssen deutlich reduziert werden und Nullemissionen angestrebt werden, um das Ansteigen der Durchschnittstemperatur zu verlangsamen. Die vertrauten Pläne der Klimapolitik beinhalten den Umstieg auf erneuerbare Energien und neue Mobilitätskonzepte, aber es lässt sich absehen, dass diese nicht schnell genug umgesetzt werden und nicht ausreichen (vgl. UNEP, 2019)

Es bedarf neue, unkonventionelle Ideen, so wie das Climate Engineering (CE) und das damit verbundene solare Strahlungsmanagement, auch Solar Radiation Management (SRM) genannt. Durch den künstlichen Eingriff in das Klima, in Form von Reflexion der Sonneneinstrahlung oder Entfernung von Kohlendioxid, soll die Erderwärmung gestoppt werden (vgl. Keith, 2013). Die Technologien, welche seit ca. fünfzehn Jahren aktiv diskutiert werden, bringen eine Vielzahl an Forschungsfragen und Unsicherheiten mit sich. Ihre Wahrnehmung ist negativ belastet, vor allem, weil eine ‚natürliche‘ Lösung des Klimaproblems wünschenswerter wäre. Aber das Thema verdient eine genauere Betrachtung, weil uns die Zeit wegläuft, die Klimakatastrophe abzuwenden und die CE-Maßnahmen teilweise großes Potenzial besitzen (vgl. Caldeira & Keith, 2010). Insbesondere die Einbringung von Schwefel (S) in die Stratosphäre (Stratospheric Aerosol Injection, SAI) bietet unbegrenztes Potenzial (vgl. Keith, 2013).

## Forschungsfragen

Im Rahmen dieser Bachelorarbeit sollen folgende zwei Forschungsfragen behandelt werden:

1. Wie muss eine internationale Governance gestaltet werden, um politisches Handeln im Rahmen des SRM, insbesondere des SAI-Managements, zu ermöglichen?
2. Welche Regulierungsmaßnahmen reduzieren die Risiken des SAI-Managements?

Die Forschung nach einem politischen Rahmen, in dem SRM umgesetzt werden kann, bringt Fragen nach nötigen Voraussetzungen, Aufgaben, Zielen und Herausforderungen mit sich. Es sei gesagt, dass keine eindeutige Anleitung für das politische Handeln herausgearbeitet werden kann, weil die Thematik zu viele Unsicherheiten und ein hohes Maß an Komplexität birgt (vgl. Reynolds, 2019). Jedoch kann mithilfe der Ergebnisse vieler Wissenschaftler ein Konzeptentwurf für die kurz- und mittelfristige Sicht erstellt werden. Bei der Gestaltung dieses Entwurfs liegt mein Fokus auf der Umsetzung eines multilateralen Ansatzes, der über die typische internationale Zusammenarbeit der Staaten hinausgeht und auch die Chancen betrachtet, die nicht staatliche Akteure bieten. Zwei Herausforderungen, die die Governance von SRM mitbringt, werden genauer betrachtet: die Gestaltung eines Haftungsregimes und die Einbeziehung der Öffentlichkeit. Diese besitzen eine große Bedeutung für die Sicherung der Legitimität und Umsetzbarkeit einer Governance.

Der zweite Schwerpunkt meiner Arbeit ist ein wenig erforschter Aspekt des SRM. Jedoch ein wichtiger, weil ohne Regulierungs- und Kontrollmechanismen ein Einsatz der Technologie fahrlässig wäre. Dabei fokussiere ich mich, im Gegensatz zum Kapitel „Politischer Rahmen innerhalb internationaler Governance“, auf einen technischen Regulierungsmechanismus. Das Hauptaugenmerk beim Einsatz von SRM-Maßnahmen muss die Minimierung der Risiken sein. Einen Großteil dieser kann man im Vorfeld durch Simulationen abschätzen, inwiefern diese valide sind und welche Unsicherheiten bei der Computermodellierung existieren, wird im Kapitel „Risiken vorbeugen mithilfe von Simulationen“ betrachtet. Die Erforschung der nachträglichen Anpassung der SAI-Maßnahmen, ist aufgrund der Gefahr einer Abbruchreaktion, die verheerende Folgen mit sich bringen würde, kaum Bestandteil der bestehenden Literatur. Um Ansätze für die Forschung zu liefern, analysiere ich wissenschaftliche Veröffentlichungen, die Möglichkeiten nennen, die Auswirkungen von SAI-Maßnahmen zu neutralisieren.

## Methodisches Vorgehen

Die Untersuchung meiner Forschungsfragen basiert auf einer Literaturrecherche. Diese umfasst die Sichtung einer Vielzahl an Dokumenten, welche für meine Arbeit relevanten Informationen, Ideen und Daten beinhalten. Jede dieser Veröffentlichungen wurde aus einem unterschiedlichen Standpunkt geschrieben, mit bestimmten Zielen (vgl. Hart, 1999). Um eine adäquate, qualitativ hochwertige Zusammenfassung und Analyse derer zu gewährleisten, sind drei Kriterien zu berücksichtigen: Relevanz, Präzision und methodische Kohärenz (vgl. Templier & Paré, 2015). Dabei bezieht sich Relevanz auf die Nützlichkeit der Untersuchung. Um eine Präzision beizubehalten, müssen Kriterien wie Reliabilität, Objektivität, interne und externe Validität erfüllt werden. Zuletzt entscheidet die Kongruenz zwischen den methodischen Komponenten und der Forschungsfrage über die methodische Kohärenz (vgl. Morse et al., 2002).

Templier und Paré (2015) formulieren sechs Schritte für die Literaturrecherche: Formulierung des Problems, Literatursuche, Untersuchung ihrer Aufnahmefähigkeit, Bewertung der Qualität, Datenextraktion und die Analyse und Synthese der Daten. Indem das zu untersuchende Problem erläutert wird, wird die Notwendigkeit der Recherche betont. Zweck, Vorgehen und Konzept sollten dabei erklärt werden (vgl. Watson & Webster, 2002). Im Rahmen dieser Forschungsfragen sollte passende Literatur ausgewählt werden, die verschiedene Ansätze für die Thematik bietet. Die Nutzung mehrerer Quellen und Literaturdatenbanken ist sinnvoll, vor allem im Rahmen der CE-Forschung, weil

die Auswahl unter Umständen begrenzt ist. Im dritten Schritt ermöglicht die Definition von Kriterien, die die Anwendbarkeit beschränken, eine systematische Auswahl passender Informationsquellen. Anschließend sollte die Qualität der vorliegenden Literatur bewertet werden und inwiefern diese valide ist. Danach erfolgt die Extraktion von relevanten Daten für die Problemstellung. Als abschließenden Schritt müssen die Daten analysiert und synthetisiert werden, d.h. die Informationen werden zusammengefasst, geordnet und verglichen. Ziel ist die Schaffung neuer Wissens Erkenntnisse, die Interpretation dieser und eine resultierende Schlussfolgerung (vgl. Templier & Paré, 2015).

Da sich der bestehende Literaturumfang zu den zwei Forschungsfragen, mit denen sich diese Bachelorarbeit befasst, bedeutend unterscheidet, fällt die Wahl der Art der Literaturrecherche ebenfalls unterschiedlich aus. Es gibt eine Vielzahl an Veröffentlichungen, die Vorschläge für eine SRM-Governance liefern, aber nur eine vergleichsweise kleine Anzahl an Literatur, die Ansätze für die technische Regulierung der SRM-Maßnahmen liefert. Daher erscheint für den ersten Themenschwerpunkt eine narrative Literaturrecherche sinnvoll, die mehrere Forschungsergebnisse zusammenfasst, vergleicht und empirische Aussagen trifft (vgl. Cronin et al., 2008). Für die Untersuchung eines möglichen technischen Regulierungsmechanismus bedarf es zusätzlich der Schaffung neuer Ansätze, die über die bestehende Literatur hinausgehen und eine Grundlage für zukünftige Forschung bieten. Damit kann man von einer „developmental review“ (Templier & Paré, 2015) sprechen, die die narrative Literaturrecherche ergänzt.

## Fazit und Ausblick

Die Governance von CE, insbesondere SRM, stellt eine neuartige Herausforderung der Klimapolitik dar, die von einer Vielzahl von Unsicherheiten geprägt ist. Potenzielle Auswirkungen der Eingriffe ins Klima können bislang nur auf Basis von Simulationen eingeschätzt werden, die vor allem Defizite in der Mikrophysik der Stratosphäre mitbringen. Die Planung der Durchführung von Feldexperimenten wie das SCoPEX bieten Hoffnung, dass die bisherigen wissenschaftlichen Erkenntnisse mit realen Daten fundiert werden können. Diese fehlenden Aufschlüsse hindern aktuell die Entwicklung einer benötigten Governance.

Im Rahmen dieser wissenschaftlichen Arbeit wurden Herausforderungen, Grenzen und Chancen internationaler Regimestrukturen herausgearbeitet. Die Vereinigung von Flexibilität, Robustheit und Effizienz mit Berücksichtigung mehrerer Prinzipien, wie z. B. Gerechtigkeit und Transparenz, ist zurzeit in keinem der bestehenden politischen Strukturen möglich. Angesichts der Risiken stellen sich nach Betrachtung der Aufgaben einer SRM-Governance mehr Fragen, als beantwortet werden können. Die kritischen Stimmen gegenüber CE sind unverändert laut und es bleibt abzuwarten, wie der fortschreitende Klimawandel und die Erkenntnisse der Forschung zu einem veränderten Meinungsbild führen, sodass politische Entscheidungsträger die Notwendigkeit für untypische Klimamaßnahmen wie das SRM sehen. Kernelement zukünftiger Betrachtungen sollte die Beteiligung der am meisten gefährdeten Bevölkerungsgruppen sein.

Benötigte Regulierungsmechanismen wurden aus politischer Perspektive umfassend in der Literatur betrachtet. Die technische Umsetzung, um nach Einsatz einer SAI-Technik die Wirkung der Aerosole zu beeinflussen, wird nur in einem Bruchteil der Veröffentlichungen diskutiert. Ansätze liefert das CG, welches als Argument gegen den Missbrauch von SRM-Maßnahmen als Waffe verwendet wird. Im Rahmen dessen jedoch Ideen zur Neutralisierung der Wirkung der Aerosole entstanden sind. In folgenden Forschungsarbeiten wäre es sinnvoll, die vorgeschlagene Synthese des CG auf einen Regulierungsmechanismus zu überprüfen und ein genaueres Vorgehen zu bestimmen. Dabei scheint die Befürchtung eines Terminationseffekts als unüberwindbares Hindernis.