

Geoengineering – eine zukünftige Strategie zur Klimabeeinflussung?

Lena Grami & Martin Rutzinger

Lena.grami@student.uibk.ac.at, martin.rutzinger@uibk.ac.at, Leopold-Franzens-Universität, 6020 Innsbruck

1 Geoengineering – Motivation

Mit dem Beginn des Industriezeitalters im 19. Jahrhundert begann, was Paul Crutzen als „Anthropozän“ bezeichnet – das Zeitalter, in dem der Mensch mit neuen Technologien in der Lage ist, seine Umwelt im globalen Maßstab zu verändern (vgl. Crutzen 2002). Die Verbrennung fossiler Brennstoffe sowie umfassende globale Landnutzungsänderungen verursachten seitdem einen raschen Anstieg der Treibhausgase in der Atmosphäre. Die wichtigsten Treibhausgase neben Wasserdampf sind Kohlenstoffdioxid (CO_2), Methan (CH_4), Distickstoffmonoxid (N_2O) und Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKWs) (vgl. Schönwiese 2003). Der Gehalt von Kohlenstoffdioxid erhöhte sich seit Beginn des 19. Jahrhunderts von etwa 280 auf 384 ppm im Jahr 2007 (vgl. Latif 2009, S. 40). Abbildung 1 zeigt den Verlauf der Konzentrationen wichtiger Treibhausgase in der Atmosphäre während der letzten 2 000 Jahre.

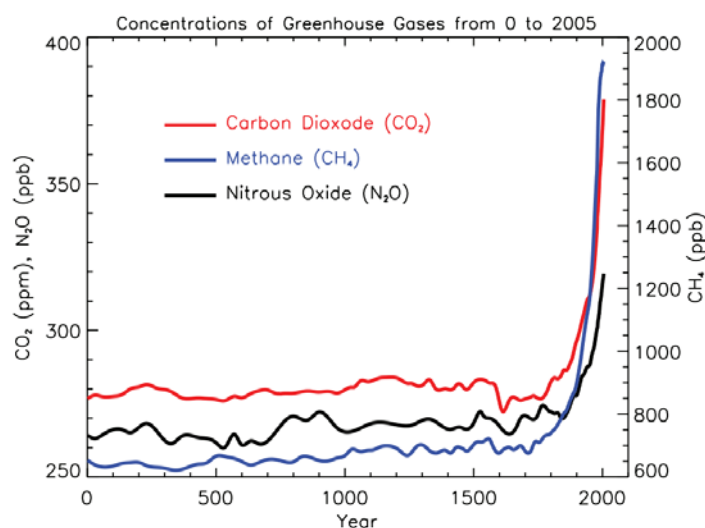


Abb. 1: Konzentration der Treibhausgase in der Atmosphäre von 0 bis 2005. Kohlenstoffdioxid (CO_2) in rot, Methan (CH_4) in blau und Distickstoffmonoxid (N_2O) in schwarz angegeben in Teilen pro Million [ppm] bzw. in Teilen pro Milliarde [ppb] (Quelle: IPCC 2007, S. 135).

Trotz umfassender internationaler Bestrebungen, den drohenden Klimawandel durch Verringerung der CO_2 -Emissionen abzuschwächen, scheint das Ziel, die klimarelevanten Treibhausgase auf einem vertretbaren Niveau zu halten, in weiter Ferne. Eine Lösung des Problems wäre allerdings bald nötig, falls, wie von manchen Wissenschaftlern vermutet, das Überschreiten klimatischer Schwellenwerte zu nichtlinearen Reaktionen des Klimas führt. Das wiederum würde dann die Aus-

wirkungen des Klimawandels noch unberechenbarer und schwerwiegender gestalten (vgl. Vaughan & Lenton 2011).

Vor diesem Hintergrund weckte der Nobelpreisträger Paul Crutzen 2006 mit seinem Artikel „Albedo enhancement by stratospheric sulfur injections: A contribution to resolve a policy dilemma?“ neues Interesse an einer möglichen Lösung für das Problem: das sogenannte „Geoengineering“, also die „vorsätzliche, großräumige Manipulation der globalen Umwelt“ (Keith 1998, S. 83). Der vorliegende Artikel befasst sich mit Ansätzen des Geoengineerings, die dem durch Treibhausgase verursachten Klimawandel entgegenwirken. David Keith erachtet zur Abgrenzung des Begriffs Geoengineering drei Merkmale als relevant: den Maßstab, den Vorsatz und das Ausmaß, dem die Aktion entgegenwirkt (vgl. Keith 2000, S. 247).

2 Historische Perspektive der Wetter- und Klimabeeinflussung

Mit Hilfe der zuvor genannten drei Eigenschaften lassen sich die heute diskutierten Technologien von den früheren Versuchen zur Wetterbeeinflussung abgrenzen. Denn der Traum von der Kontrolle des Wetters reicht weit in die Geschichte zurück. Schon sehr früh versuchten Menschen durch Wetterläuten, Bittprozessionen oder Wetterzauber das Wetter zu beeinflussen, um zum Beispiel schlechte Ernteerträge abzuwenden. Ernteauffälle in Mitteleuropa während der kleinen Eiszeit führten zu sozialen Spannungen und waren somit einer der Gründe für die Verfolgung von Hexen, denen man die Fähigkeit zur Wetterbeeinflussung zuschrieb (vgl. Behringer 2007). Bereits Mitte des 19. Jahrhunderts versuchte James Pollard Epsy durch großflächige Waldbrände Regen zu erzeugen. Sein Experiment, den Ohio River dadurch ganzjährig befahrbar zu machen, scheiterte allerdings (vgl. Fleming 2006). Hierbei, wie auch bei anderen weniger wissenschaftlichen Versuchen dieser Zeit, ging es also im Gegensatz zu heutigen Ansätzen um eine lokale Wetterbeeinflussung. Es standen der Schutz vor Wetterereignissen und damit auch eine wirtschaftlich begründete „Verbesserung“ des Wetters im Vordergrund.

1946 begann der zweite Abschnitt in der Geschichte der Klimabeeinflussung: Der Amerikaner Vincent Schaefer entdeckte eine Methode zur „Wolkenimpfung“: Dabei werden Wolken durch die Zugabe von Kondensationskernen wie zum Beispiel Trockeneis künstlich erzeugt. Dies weckte neue Hoffnung auf eine zukünftige Kontrolle des Wetters. In zivilen Anwendungen wurden solche Methoden zum Beispiel zur Abwendung von Hagelereignissen eingesetzt. Da die Risiken solcher Eingriffe nicht abzusehen sind, wurde die Technologie allerdings vorrangig zu militärischen Zwecken weiterentwickelt. Besonders während des Kalten Krieges wurde der Einsatz der Wolkenimpfung als subtile Waffe gegen den Gegner in Erwägung gezogen. „Die Nation, die es als Erste versteht, die Wege der Luftmassen aufzuzeichnen, sowie Zeit und Ort des Niederschlags zu bestimmen, wird die Erde dominieren“ (Fleming 2006, S. 10). Dieses Zitat von General George C. Kenney zeigt sowohl den uneingeschränkten Glauben in die technische Entwicklung als auch die zentrale Stellung der Wetterbeeinflussung innerhalb der atmosphärenwissenschaftlichen Forschung in der Mitte des 20. Jahrhunderts (vgl. Keith 2000, S. 250). Nach dem Einsatz der Wolkenimpfung im Vietnamkrieg durch das amerikanische Militär kam es Ende der Siebziger Jahre schließlich zu einer Vereinbarung über den Verzicht auf eine militärische Verwendung der Technologie. Dieser Rückschlag sowie die

aufkommende Umweltbewegung und die Einsicht in die überschätzte Effektivität der Wolkenimpfung führten in dieser Zeit zu einem starken Forschungsrückgang (vgl. ebd., S. 253).

Heute befinden wir uns im dritten großen Abschnitt der Klimabeeinflussung: Der Bericht des Nationalen Forschungsrats von 2003 betonte die Notwendigkeit neuer Klimamodifikationsforschung, um den Folgen des Klimawandels entgegenzuwirken. Da sich Bemühungen um die Reduktion von Emissionen als ungenügend erweisen und für das Erreichen von klimarelevanten Zielen vermutlich nur noch wenig Zeit bleibt, wird Klimamodifikation – in diesem Fall Geoengineering – heute als eine zukünftige technisch innovative Möglichkeit diskutiert, um drohenden Klimaveränderungen entgegenzuwirken (vgl. Crutzen 2006). Damit erfüllen die heute diskutierten Konzepte die drei Merkmale des bereits definierten Begriffes Geoengineering: Es handelt sich um eine großräumige, vorsätzliche Klimamodifikation zur Abwehr des anthropogen verursachten Klimawandels. Die aktuell diskutierten möglichen Ansätze des Geoengineering werden im folgenden Kapitel näher dargestellt.

3 Ansätze

Der natürliche Treibhauseffekt ist die Grundlage für die Existenz des Lebens auf der Erde. Treibhausgase behindern die langwellige Ausstrahlung der Erde und damit auch das Auskühlen der Atmosphäre. Neben natürlich bedingten Klimaschwankungen, wird der Prozess des Treibhauseffekts durch den menschlich bedingten Ausstoß klimarelevanter Treibhausgase verstärkt, was wesentlich zur Erderwärmung und damit verbunden zu globalen Klimaveränderungen beiträgt (vgl. Latif 2009). Die logischen Konsequenzen zur Vermeidung der Erderwärmung sind also entweder die Verminderung eintreffender kurzweiliger Strahlung oder die Reduzierung der Treibhausgase, um die langwellige Ausstrahlung zu erhöhen. Demnach unterscheidet man bei den Ansätzen des Geoengineering zwei Hauptgruppen: das Strahlenhaushaltsmanagement und die CO₂-Sequestrierung (Speicherung). Abbildung 2 zeigt eine Übersicht über die gängigen Vorschläge zu Geoengineering.

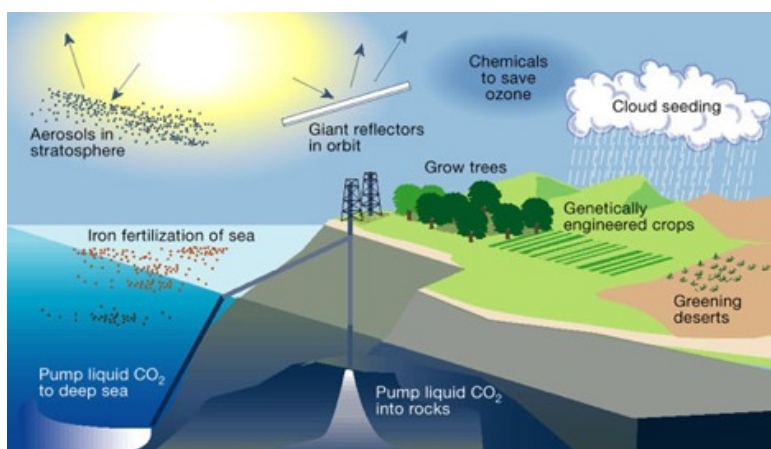


Abb. 2: Ausgewählte Ansätze des Geoengineerings: Einbringung von Aerosolen in die Stratosphäre, Strahlungsreflektoren in der Erdumlaufbahn, Chemikalien zur Bindung von Ozon, Wolkenerzeugung durch Kondensationskerne, Eisendüngung der Ozeane, ozeanische Kohlendioxidbindung, Kohlendioxideinbringung im Gestein, Aufforstung, genetisch veränderte Nutzpflanzen, Begrünung von Wüsten (Quelle: Schneider 2001, S. 420).

3.1 Veränderung des Strahlenhaushaltes

Diese Ansätze konzentrieren sich auf die Veränderung der Bilanz zwischen einfallender solarer und ausgehender thermischer Strahlung. Man unterscheidet sie nach dem Ort ihrer Anwendung: im Weltall, in der Atmosphäre oder am Boden.

3.1.1 Weltraumreflektoren

Ein Ansatz, die einfallende Sonnenstrahlung bereits vor dem Eintritt in die Atmosphäre der Erde zu verringern, wäre das Installieren von Sonnensegeln bzw. Reflektoren im Weltall. Nach der Installation der Reflektoren könnte bereits innerhalb von wenigen Jahren die Einstrahlung deutlich reduziert und damit dem Treibhauseffekt entgegengewirkt werden. Der Aufwand zur Umsetzung dieser Projekte wäre extrem hoch und ist vergleichbar mit einem Vorschlag aus den 1970er Jahren – der Installation von Solarzellen im Weltraum zur Gewinnung von Sonnenenergie, die über einen Energiestrahl auf terrestrische Empfängerstationen übertragen werden sollten (vgl. Keith 2000).

3.1.2 Erhöhung der atmosphärischen Rückstrahlung

Der Ausbruch des philippinischen Vulkans Pinatubo im Jahr 1991 zeigte einen Effekt, den sich die aktuell diskutierten Geoengineering-Konzepte zunutze machen: Durch den immensen Ausstoß von Schwefeldioxid in die Stratosphäre kam es im Jahr nach dem Ausbruch zu einer globalen Temperaturabnahme von 0,5°C. Dies ist auf die Verringerung der Sonneneinstrahlung durch die verstärkte Reflexion an den Aerosolen zurückzuführen. Mit der Injektion von Schwefeldioxid in die atmosphärische Zirkulation könnte dieser Effekt des sogenannten „global dimming“ (vgl. Latif 2009) auf künstliche Weise erzielt werden (vgl. Crutzen 2006). Obwohl diese Methode im Vergleich zu anderen Vorschlägen relativ kostengünstig und leicht durchführbar wäre, gibt es auch einige Nebeneffekte zu berücksichtigen. Die Anreicherung von Sulfat in der Atmosphäre könnte die Ozonschicht schädigen und zur Veränderung der Niederschlagsregime führen. So hat sich zum Beispiel beim Ausbruch des Pinatubo 1991 der Niederschlag über Landflächen verringert, und der afrikanische und asiatische Sommermonsun verändert (vgl. Vaughan & Lenton 2011).

Bei der zweiten Möglichkeit wird der schützende Effekt von Wolken für die Verringerung der einfallenden Strahlung ausgenutzt. Dies geschieht durch die künstliche Vermehrung von Wolken über dem Meer durch die Zugabe von Kondensationskernen sowie durch die Erhöhung der Wolken-Albedo durch eine erhöhte Anzahl von Wolkentröpfchen (vgl. ebd.).

3.1.3 Terrestrisches Strahlungsmanagement

Die dritte Möglichkeit des Strahlungsmanagements läge in der Erhöhung der Albedo an der Erdoberfläche, also die Erhöhung des reflektierten Strahlungsanteils am Boden. Dies könnte durch den Anbau hellerer Pflanzen, die Einführung hellerer Dächer und Straßenbeläge sowie die Errichtung einer reflektierenden Oberflächenschicht in Wüsten erreicht werden. Allerdings weisen auch diese Ansätze erhebliche Mängel auf. Da hellere Pflanzen aufgrund des geringen Chlorophyllgehaltes

weniger Photosynthese betreiben, würde sich die Umwandlung von CO₂ in Sauerstoff verringern, was zur Klimaerwärmung beitragen könnte. Natürlich würde auch die Veränderung der Wüstenalbedo ein massiver Eingriff in bestehende Ökosysteme darstellen (vgl. ebd.).

3.2 Sequestrierung von Kohlenstoffdioxid

Die zweite große Gruppe der Geoengineering-Ansätze zielt auf die Absonderung und Speicherung von klimarelevantem CO₂ aus der Atmosphäre in bereits vorhandenen bzw. neu errichteten CO₂-Senken. Man unterscheidet dabei drei Untergruppen: Die Erweiterung der terrestrischen bzw. ozeanischen Senke sowie die direkte Entnahme von CO₂ aus der Luft (vgl. ebd.).

3.2.1 Terrestrische CO₂-Bindung

Bereits in den 1970er Jahren entstand die Idee, durch Auf- bzw. Wiederaufforstung CO₂ aus der Atmosphäre zu binden. Heute spielt diese Form des Geoengineering eine zentrale Rolle in der Diskussion über die Modifikation des Klimas, insbesondere weil sie ein umweltverträgliches Instrument der Klimabeeinflussung darstellt (vgl. Keith 2000). Allerdings weist sie auch einige Unsicherheiten auf. Die Dauer der CO₂-Speicherung in Biomasse liegt lediglich bei ca. 50 Jahren, zudem stünde dieser Ansatz im globalen Maßstab in starker Konkurrenz zu anderen Flächennutzungen wie etwa der Nahrungsmittelversorgung. Da ein Großteil des im Boden gespeicherten CO₂ in Gebieten zu finden ist, die bisher nicht bewachsen sind, könnte eine Aufforstung zu einem Entweichen des Treibhausgases aus dem Boden führen. Außerdem ist mit diesem Eingriff in die natürlichen Ökosysteme auch mit starken Auswirkungen auf die Biodiversität der Erde zu rechnen (vgl. Vaughan & Lenton 2011).

Ein weiterer Ansatz zur terrestrischen Kohlenstoffbindung ist die Herstellung sogenannter „Biokohle“. Das CO₂ könnte hierbei in der Biomasse gespeichert und unterirdisch gelagert werden. Da die Biokohle den Nährstoffgehalt des Bodens erhöht, kann sie auch als Düngersatz verwendet werden, außerdem ist die Produktion quasi unbegrenzt möglich. Allerdings könnte es im globalen Rahmen durch die Verdunklung des Bodens zu einer Verringerung der Albedo kommen, was wiederum die Klimaerwärmung verstärken würde (vgl. ebd.).

3.2.2 Ozeanische CO₂-Bindung

Die Ozeane fungieren als größte CO₂-Senke der Erde, ihre Speicherkapazität wird auf etwa 38 000 Gigatonnen geschätzt. Damit haben sie seit dem Beginn der industriellen Revolution etwa ein Viertel der anthropogenen Treibhausgase aufgenommen. Das aufsteigende Tiefenwasser kühlt die Atmosphäre, beim Absinken des Wassers wird das CO₂ mittransportiert und somit gespeichert (vgl. Latif 2009). Da angenommen wird, dass die Kapazität der ozeanischen Senke noch kaum ausgeschöpft ist, gibt es verschiedene Überlegungen, sowohl die biologische als auch die mechanische CO₂-„Pumpe“ in den Ozeanen zu verstärken.

Die Anregung des Algenwachstums ist eine Möglichkeit, die biologische Pumpe zu verstärken. Dies könnte entweder durch die Zugabe von Nährstoffen oder durch den künstlichen Auftrieb von nährstoffreichem Tiefenwasser erreicht werden. Bei den Nährstoffen handelt es sich vor allem um Phosphor und Eisen. Allerdings würde ein Großteil des gebundenen CO₂ beim Absterben der Algen wieder frei und damit zurück in die Atmosphäre abgegeben werden (vgl. Vaughan & Lenton 2011). Außerdem hätte dieser immense Eingriff auf den Nährstoff- und den CO₂-Gehalt der Meere vermutlich erhebliche Auswirkungen auf die natürlichen Ökosysteme (vgl. Keith 2000).

Auch durch die Verstärkung der Tiefenwasserzirkulation kann eine verstärkte Aufnahme von CO₂ aus der Atmosphäre erreicht werden. Hierzu wird überlegt, das Oberflächenwasser um 1°C abzukühlen. Die Kosten für die Durchführung dieser Methode sowie die mangelnde Effektivität erheben jedoch Zweifel an die grundlegende Konzeption dieses Ansatzes (Vaughan & Lenton 2011).

3.2.3 CO₂-Filterung aus der Luft

Eine weitere Möglichkeit der CO₂-Speicherung wäre, das Gas mithilfe von technischen Geräten aus der Luft zu selektieren, zu komprimieren und in geeigneten Lagerstätten zu speichern. Die Menge des speicherbaren CO₂ wäre damit nur von der Größe und Kapazität des Speicherortes abhängig. Da die Durchführung dieses Ansatzes allerdings permanent und derzeit unter Verwendung von fossilen Energien erfolgen müsste, würde der tatsächliche Effekt stark verringert werden (vgl. ebd.).

4 Risiken und Grenzen

Der anthropogen mitverursachte Klimawandel ist ein Effekt des modernen Industriezeitalters. Seine Auswirkungen zeigen, wie stark menschliche Eingriffe die klimatischen Abläufe der Erde mitbeeinflussen können. Dabei bilden auch die vorgestellten Ansätze zum Geoengineering keine Ausnahme, da es sich bei ihnen auch um großmaßstäbige Eingriffe handelt. Deshalb ist es notwendig, die möglichen Risiken der Ansätze zu beachten, sowie die Grenzen der Wirksamkeit aber auch der technischen und juristisch-politischen Machbarkeit aufzuzeigen.

4.1 Technische, politische und finanzielle Beschränkungen

Im Hinblick auf die drohenden Auswirkungen des voranschreitenden Klimawandels scheint die weitere Auseinandersetzung mit Geoengineering-Lösungen legitim. Neben der Erfassung der theoretischen Grundlagen wie zum Beispiel Planung der technischen Umsetzung und CO₂-neutrale Implementierung, würden auch Feldversuche eine wesentliche Rolle spielen, um die Wirkung und Effektivität zu testen. Da die Nebeneffekte allerdings kaum abschätzbar sind, wurden bisher vor allem Modellstudien durchgeführt (vgl. ebd.). Diese Modellstudien können die komplexen Zusammenhänge des Systems Erde nicht ausreichend erfassen. Da unerwartete Nebeneffekte auftreten können, birgt eine reale Durchführung auf der Grundlage von Modellen Risiken in sich.

Die beiden Hauptgruppen der oben beschriebenen Ansätze des Geoengineerings unterscheiden sich in wesentlichen Punkten voneinander. Vorschläge zur CO₂-Bindung wirken eher langfristig,

sind allerdings auch mit geringeren Risiken verbunden. Technologien zum Strahlungsmanagement dagegen könnten bereits kurzfristig große Effekte erzielen, weisen jedoch auf der anderen Seite erhöhte Risiken bei einem Ausfall oder Abbruch der Maßnahme auf (vgl. ebd.). Ein weiteres Problem wäre die Implementierung von Maßnahmen von einzelnen Staaten im Alleingang. Bei gleichzeitiger, nicht abgestimmter Durchführung durch verschiedene Staaten wären katastrophale Auswirkungen nicht auszuschließen. Zudem könnten die Technologien (zum Beispiel die Abschattung einzelner Gebiete) als Kriegswaffe gegen andere Staaten eingesetzt werden (vgl. Keith 1998, S. 86). Deshalb wäre ein den Staaten übergeordnetes Verwaltungsorgan zur verantwortungsvollen und abgestimmten Durchführung klimamodifizierender Projekte nötig. Dieses Organ müsste über ausreichend Autorität und Finanzmittel verfügen, um in klimarelevanten Zeitspannen wirksam zu sein (vgl. Schneider 2001).

Um eine CO₂-Verdopplung in der Atmosphäre auszugleichen, würde eine Fläche von rund 4,7 Mio. km² (vgl. 4,3 Mio. km² Fläche aller EU-Staaten) an Reflektoren im Weltraum benötigt werden. Für die Bereitstellung der heute global benötigten Primärenergie wäre dagegen eine terrestrische Fläche von etwa 84 300 km² (vgl. 83 900 km² Fläche Österreichs) Solarzellen nötig (vgl. Vaughan & Lenton 2011). Dieser Vergleich weist auf einen weiteren Aspekt zur sinnvollen Evaluierung von Geoengineering-Ansätzen hin. Die angewendeten Ansätze sollten nicht teurer und aufwendiger sein als die Methoden zur bislang angestrebten Emissionseinsparung. Abbildung 3 zeigt eine Übersicht zu der Effektivität, den Kosten, der Sicherheit sowie der Dauer der Installation bzw. eines vorzeitigen Abbruchs von Geoengineering-Ansätzen (vgl. Boyd 2008). Wichtig dabei ist, die Auswirkungen der Nebeneffekte und die damit verbundenen Kosten bei den Berechnungen mit einzubeziehen. Die Darstellung bietet einen relativen Vergleich viel diskutierter Ansätze im Hinblick auf die wichtigsten Parameter Effizienz, Kosten, Sicherheit und Zeitaufwand. Bei der Bewertung des Grundprinzips werden Ansätze, welche auf historischen Beobachtungen beruhen, stärker bewertet als modellgeleitete Theorien. Auch bei der Testbarkeit werden Ergebnisse bereits durchgeführter Feldversuche stärker gewichtet als Modellsimulationen. Die initiale Schätzung der Kosten umfasst lediglich den finanziellen Aufwand der Durchführung, während die zweite Zeile die Kosten möglicher Nebeneffekte miteinbezieht. Bei der Kategorie der Sicherheit werden mehrere Beurteilungen unterschieden: die Nebeneffekte, welche bereits quantifizierbar sind, die Systemkomplexität, welche Aufschluss über das Ausmaß unberechenbarer Nebeneffekte gibt, und die Prüfung der Wirksamkeit sowie der Nebeneffekte. Die Schnelligkeit umfasst die Dauer für die Abschwächung des Klimawandels (je höher bewertet, desto schneller) sowie die Möglichkeit des vorzeitigen Abbruchs der Aktion. Dies hängt vor allem mit der Verweildauer der zugeführten Substanzen bei chemischen Methoden ab. Je höher der Ansatz bewertet ist, desto kürzer ist die Verweildauer (vgl. Boyd 2008).

	Ozean- düngung	Stratosphären aerosole	Wolken- bildung	Atmosph. CO ₂ Speicherung	Geochem. CO ₂ Speicherung
Effizienz					
Grundprinzip	■	■	■	■	■
Testbarkeit	■	■	■	■	■
Leistbarkeit					
Initiale Schätzung	■	■	■	■	■
Nebeneffekte	■	■	■	■	■
Sicherheit					
Nebeneffekte	■	■	■	■	■
Systemkomplexität	■	■	■	■	■
Verifikation	■	■	■	■	■
Schnelligkeit					
Schadensminderung	■	■	■	■	■
Stop bei Notfall	■	■	■	■	■

Abb. 3: Bewertung ausgewählter Ansätze des Geoengineering (nach Boyd 2008, S. 724).

4.2 Unvorhersehbare Nebeneffekte

Die Erde und ihre Kreisläufe bilden ein komplexes System, dessen Teile auf vielfältige Weise verflochten sind und miteinander interagieren. Der Eingriff in eines oder mehrere ihrer Subsysteme kann folglich zu weitreichenden unvorhersehbaren Auswirkungen führen (vgl. Vaughan & Lenton 2011). Für die Ansätze, die in den Strahlungshaushalt eingreifen, ist mit weitreichenden Auswirkungen auf den Wasserkreislauf zu rechnen. So könnte zum Beispiel die Reduktion kurzweiliger Einstrahlung zu einer Verringerung der Verdunstung und somit auch des Niederschlages führen. Aufgrund der globalen Strahlungsverteilung wären von diesem Effekt die tropischen Gebiete besonders betroffen (vgl. ebd.). Die Auswirkungen auf die globalen Kreisläufe der Erde wären damit kaum abschätzbar. Die Vorschläge für Geoengineering lassen sich nach der Vorhersagbarkeit ihrer Nebeneffekte folgendermaßen beschreiben. Man unterscheidet Ansätze mit

- abschätzbaren und bereits quantifizierbaren,
- anfänglich nicht abschätzbaren und
- vollkommen unvorhersehbaren Nebeneffekten.

Die Höhe des Risikos hängt hierbei auch stark vom räumlichen und zeitlichen Ausmaß sowie der Umkehrbarkeit der angewendeten Methoden ab (vgl. Boyd 2008).

4.3 Heterogenität der Auswirkungen und Verschärfung internationaler Konflikte

Je nach Maßstab und Langzeitwirkung ist auch die regionale Verteilung der Nebeneffekte unterschiedlich. Die Auswirkungen des Klimawandels verteilen sich nicht gleichmäßig auf der Erde. Auch bei der Durchführung von Projekten zur vorsätzlichen Klimabeeinflussung werden sich die

Effekte unterschiedlich auf verschiedene Regionen auswirken. Wie bereits in Kapitel 3.1 beschrieben, könnte eine Verringerung der solaren Einstrahlung die Niederschlagsmenge- und Verteilung auf der Erde verändern. Eine solche Umverteilung natürlicher Ressourcen könnte folglich zu erheblichen Konflikten zwischen bzw. innerhalb von Nationen führen. Besonders bei der gleichzeitigen, unabgestimmten Durchführung verschiedener Projekte ließen sich die Auswirkungen kaum zuordnen und damit die Verantwortlichen nur schwer zur Rechenschaft ziehen (vgl. Boyd 2009).

5 Ethische Aspekte

„Die moderne Technik hat Handlungen von so neuer Größenordnung, mit so neuartigen Objekten und so neuartigen Folgen eingeführt, daß der Rahmen früherer Ethiken sie nicht mehr fassen kann“ (Jonas 1979, S. 26) schrieb Hans Jonas bereits 1979 in seinem Werk *„Das Prinzip Verantwortung“*. Im Hinblick auf aktuell diskutierte Ansätze für Geoengineering erlangt dieser Satz eine neue Dimension. Derartige Eingriffe wären ein nächster Schritt, mit dem sich der Mensch seine Umwelt weiter nach seinen Vorlieben und Bedürfnissen gestaltet. Da sich die Auswirkungen unterschiedlich verteilen würden, wirft die Diskussion um Geoengineering auch die Frage nach den Rechten von Minderheiten und wirtschaftlich schwachen Staaten auf. Die Diskrepanz zwischen Staaten, welche die Durchführung finanzieren können, und jenen, welche von den möglichen Nebeneffekten betroffen wären, müsste diskutiert werden.

Im Zeitalter der Technisierung und der damit verbundenen Möglichkeit globaler Einflussnahme scheinen herkömmliche Prinzipien, die das direkte menschliche Zusammenleben regeln, nicht mehr auszureichen. Wir sind heute in der Lage, bewusst oder unbewusst mit unserem Handeln die Lebensgrundlage weit entfernter oder späterer Generationen zu verändern oder zu gefährden. Daher empfiehlt Hans Jonas eine Erweiterung von Kants Imperativ: *„Handle so, daß die Wirkungen deiner Handlung verträglich sind mit der Permanenz echten menschlichen Lebens auf Erden“* (Jonas 1979, S. 36).

6 Fazit

Die bereits große Anzahl der Geoengineering-Ansätze zeigt das große Interesse an technischen Lösungen des Klimawandelproblems, das durch Emissionseinsparungen derzeit nicht bewältigbar scheint. Doch es bleibt fraglich, ob diese Methoden der vorsätzlichen Klimaveränderung eine effektive und langfristige Lösung bieten können. Durch die Veränderung des Strahlenhaushaltes wird das Problem der Umweltverschmutzung durch den steigenden Ausstoß von CO₂ nicht gelöst (vgl. Langenberg 2008). Auch die permanente Speicherung von CO₂ kann die Umrüstung auf regenerative Energien nicht auf Dauer ersetzen, ganz abgesehen von den kaum berechenbaren Nebeneffekten und Risiken, welche die Anwendung der jeweiligen Methode mit sich bringen könnte. *„We are treating the symptom, not the cause“* (Kiehl 2006, 227). Dieses Zitat beschreibt das vielleicht größte Risiko des Geoengineering, die Konzentration auf die Abschwächung der **Auswirkungen** des Klimawandels, anstatt die **Ursachen** zu bekämpfen. Da die Konsequenzen derartiger Eingriffe nach heutigem Forschungsstand kaum abschätzbar sind (vgl. Levi 2008), bedarf es internationaler

Normen und „Best Practice“-Richtlinien, um technische Lösungen und Feldversuche mit minimalem Risiko entwickeln zu können. Eine angenommene zukünftige Umsetzung von Geoengineering-Strategien bedarf eines breiten und transparenten internationalen Legitimierungsprozesses (vgl. Blackstock and Long 2010). Es bleibt jedoch anzumerken: Der Mensch hat seit der industriellen Revolution und der damit einsetzenden Technisierung zum heutigen Problem der Klimaveränderung beigetragen. Es ist ratsam, die **Ursachen** der Fehlentwicklungen zu korrigieren, anstatt den Symptomen mit dem Ansatz des bewussten globalen technischen Eingriffs entgegenzutreten.

7 Literatur

- Behringer, W. (2007): Kulturgeschichte des Klimas. C. H. Beck Verlag, München, Germany.
- Blackstock, J.J. & Long, J.C.S. (2010): The politics of Geoengineering. *Science* 29 (327), S. 527.
- Boyd, P.W. (2008): Ranking geoengineering schemes. *Nature Geoscience* 1 (11), S. 722-724.
- Crutzen, P.J. (2006): Albedo enhancement by stratospheric sulfur injections: A contribution to resolve a policy dilemma? *Climatic change* 77 (3-4), S. 211-219.
- Fleming, J.R. (2006): The pathological history of weather and climate modification: Three cycles of promise and hype. *Historical Studies in the Physical and Biological Sciences* 37 (1), S. 3-25.
- Jonas, H. (1979): Das Prinzip Verantwortung – Versuch einer Ethik für die technologische Zivilisation. Insel Verlag, Frankfurt am Main, Germany.
- Keith, D.W. (1998): Geoengineering Climate. In: Hassol, S.J. & Katzenberger, J. (Hrsg.): *Elements of Change 1998*. Aspen Global Change Institute, Aspen Colorado, S. 83-88.
- Keith, D.W. (2000): Geoengineering the climate: History and Prospect. *Annual review of Energy and Environment* 25, S. 245-284.
- Kiehl, J.T. (2006): Geoengineering climate change: Treating the symptom over the cause? *Climatic change* 77 (3-4), S. 227-228.
- Langenberg, H. (2008): Half-hearted engineering. *Nature Geoscience* 1 (11), 719.
- Latif, M. (2009): Klimawandel und Klimadynamik. Eugen Ulmer KG, Stuttgart, Germany.
- Levi, B.G. (2008): Will desperate climates call for desperate geoengineering measures? *Physics today* 61 (6), S. 26-28.
- IPCC (2007): Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, In: Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K.B., Tignor, M. and Miller, H.L. (Eds.), *Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Schneider, S.H. (2001): Earth system engineering and management. *Nature* 409, S. 417-421.
- Schönwiese, C.-D. (2003): *Klimatologie*. 2. Auflage. UTB, Stuttgart, Germany.
- Vaughan, N.E. & Lenton, T.M. (2011): A review of geoengineering proposals. *Climatic Change*, S. 1-46.