





THOMAS RAMGE

# DIE SONNE DIMMEN

Wie GEOENGINEERING  
die Menschheit vor  
der Klimakatastrophe  
retten kann



PENGUIN VERLAG

Der Verlag behält sich die Verwertung des urheberrechtlich geschützten Inhalts dieses Werkes für Zwecke des Text- und Data-Minings nach § 44 b UrhG ausdrücklich vor.  
Jegliche unbefugte Nutzung ist hiermit ausgeschlossen.



Penguin Random House Verlagsgruppe FSC® N001967

1. Auflage

Copyright © 2024 Penguin Verlag  
in der Penguin Random House Verlagsgruppe GmbH,  
Neumarkter Straße 28, 81673 München  
Lektorat: Evelin Schultheiß, Kirchwalsede  
Grafiken: Peter Palm, Berlin  
Umschlaggestaltung: Büro Jorge Schmidt, München  
Umschlagmotiv: © AdobeStock/Daria und Krit  
Satz: satz-bau Leingärtner, Nabburg  
Druck und Bindung: GGP Media GmbH, Pößneck  
Printed in Germany  
ISBN 978-3-328-60377-1  
[www.penguin-verlag.de](http://www.penguin-verlag.de)

*Für Moritz*



# Inhalt

- 1** Einstieg: Himmel und Schwefel  
9
- 2** Klima: Warum wir die Sonne dimmen müssen  
19
- 3** Technik: Der Werkzeugkasten der Geoingenieure  
49
- 4** Forschung: Die Risiken und Nebenwirkungen  
85
- 5** Recht: Vereinte Geoengineering-Nationen  
117
- 6** Szenario: Eine Erzählung aus dem Jahr 2040  
143
- 7** Politik: Geoengineering? Ja bitte!  
161

Dank  
175

Anmerkungen  
177

Quellenverzeichnis  
191

Über den Autor  
207



## Einstieg: Himmel und Schwefel

### Not so cool Cooling Credits

Luke Iseman und Andrew Song stehen auf einem Parkplatz an der San Francisco Bay. Es ist ein sonniger Aprilmorgen, noch kühl, aber kaum Wind. Neben ihrem grauen Wohnmobil liegt eine große Heliumflasche auf dem Asphalt. Iseman führt den Schlauch von der Flasche an die Öffnung eines Wetterballons. Song dreht das Ventil auf, der weiße Ballon füllt sich langsam auf seinen Durchmesser von rund zwei Metern. Iseman hält ihn fest im Griff. Er löst den Schlauch, schließt die Ballonöffnung mit schwarzem Isolierband. »Wir sind definitiv keine Wissenschaftler«, sagt der Mittdreißiger mit dem Irokesenschnitt und lächelt verschmitzt in die Kamera des CBS-Fernsehtams. Dann lässt er los. Der Ballon steigt zunächst überraschend langsam, nimmt dann aber doch zügig Fahrt auf für seine Reise in die Stratosphäre. Die beiden Gründer des kalifornischen Start-ups »Make Sunsets« schauen zufrieden nach oben. Dem Helium ist Schwefeldioxid beigemischt. Wieder setzt Iseman sein Lächeln auf: »Die Menge Schwefel ist lächerlich wenig, aber ein Anfang.« Die Sache mit dem Anfang kennt man von kalifornischen Gründern, wenn sie die Welt verändern und dabei reich werden wollen.

Kennengelernt haben sich Luke Iseman und Andrew Song im Jahr 2015. Iseman arbeitete zu der Zeit als Direktor für Hardware-

Start-ups der renommierten Start-up-Schmiede Y Combinator. Song stand als Marketingmanager in Diensten von Indiegogo, einer Plattform, auf der Erfinder Geld für ihre Projekte einsammeln. Gemeinsam haben sie 2022 dann selbst Investoren überzeugt, mehr als eine Million Dollar in ihre Idee zu investieren. In rund 20 Kilometern Höhe wird der Wetterballon platzen und das Schwefeldioxid freisetzen. Sie verdienen damit nicht nur Geld, sondern helfen auch dem Klima. So sehen das zumindest die Make-Sunsets-Entrepreneure. Die junge Firma macht ihren Kunden ein günstiges Angebot. Für zehn Dollar bringen sie mit Wetterballons ein Gramm Schwefeldioxid ( $\text{SO}_2$ ) in die Stratosphäre ein. Dort bildet das Schwefelgas in Verbindung mit kleinen Wassertropfchen eine weiße Nebelschicht, die sich mindestens ein Jahr hält. Diese Schicht reflektiert Sonnenstrahlung zurück ins All, sodass weniger Sonnenenergie durchdringen kann, die die Erde aufheizt. Ein Gramm Schwefeldioxid in der Stratosphäre gleicht den Klimaschaden von einer Tonne Kohlendioxid aus, behauptet Make Sunsets. Auf der Unternehmenswebseite teilen Iseman und Song regelmäßig mit, wie viele Kilogramm  $\text{SO}_2$  sie aufsteigen lassen.<sup>1</sup> Skeptiker halten das Start-up für einen PR-Stunt. Viel zu gering sei die Schwefelmenge, um in der Stratosphäre eine Kühlwirkung zu entfalten. Immerhin, der PR-Effekt ist messbar. Über Medien in der gesamten Welt senden Iseman und Song ihre zentrale Botschaft: Der Planet Erde lässt sich vor dem Klimakollaps nur noch bewahren, wenn die Menschen so schnell und so effektiv wie möglich die Sonne dimmen. Klimaforscher und -schützer schlagen die Hände über dem Kopf zusammen.<sup>2</sup>

Seit rund 15 Jahren streitet die Forschungsgemeinde darüber, ob sogenanntes solares Geoengineering überhaupt näher erforscht werden soll. Der Weltklimarat IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) ignoriert das Thema konsequent, unter anderem, weil eine Reihe Länder, darunter Deutschland,

eine Diskussion dazu blockieren. Die Mehrzahl der IPCC-Wissenschaftler und Klimaschützer möchte unbedingt den Eindruck vermeiden, es gäbe eine einfache, schnelle und günstige Lösung für den Treibhauseffekt. Und dann kommt ein kleines Start-up aus Kalifornien daher und macht ohne seriöse wissenschaftliche Begleitung aus Sonnenstrahlenmodifikation (Solar Radiation Modification, kurz SRM) ein fragwürdiges Geschäftsmodell. Make Sunsets zeigt vor allem, wie Geoengineering nicht ablaufen sollte. Aber manchmal braucht es wohl Tabubrüche, um festgefahrene Debatten aufzubrechen und der Politik neue Impulse zu geben. Die Klimadebatte hat einen solchen Impuls dringend nötig. Sie hängt in einer Dauer-Wiederholungsschleife in Parlamenten, internationalen Foren und Talkshows. Derweil steigen die Temperaturen immer weiter – die Emissionen ebenso. Solares Geoengineering wird die Diskussionen und Verhandlungen über Klimapolitik in den kommenden Jahren aufbrechen und in eine neue Richtung lenken. Und die Technologie wird sich spätestens im nächsten Jahrzehnt ihren Weg in die Welt bahnen – ob wir das wollen oder nicht.

Die Silicon-Valley-Ballons in der Stratosphäre sind eine Vorausdeutung auf die Klimawelt von morgen. Es ist keine Frage mehr, ob solares Geoengineering betrieben werden wird, sondern nur noch, wann, ob geplant und im Zusammenwirken wichtiger geopolitischer Akteure oder vogelfrei von wem auch immer. Die Sonne zu dimmen, ist billig. Man könnte auch sagen: zu billig. Die Erdtemperatur mit Schwefelaerosolen auf dem aktuellen Niveau zu halten, kostet voraussichtlich weniger als 20 Milliarden US-Dollar jährlich. Damit ließen sich kurzfristig Hunderte Milliarden an Klimafolgekosten einsparen, mittelfristig vermutlich Billionen. Staaten oder auch kleine Staatsgemeinschaften aus dem Globalen Süden, die besonders stark unter dem Klimawandel leiden, wären in der Lage, die

Sonne zu dimmen. Ein Technik-fanatischer Tycoon mit einem Persönlichkeitsprofil eines Elon Musk könnte sich dazu berufen fühlen, das Thermostat der Erde herunterzuregeln. Auch eine radikale Non-Profit-Organisation mit vielen Unterstützern im Hintergrund könnte ankündigen: Das Leid durch Klimafolgen ist zu groß. Solare Strahlenmodifikation mag keine perfekte Lösung sein, ist aber besser als gar keine. Wir machen das jetzt. Und irgendein Land ließe sich schon finden, das die Starterlaubnis für Ballons oder Flugzeuge gibt. Vorstellbar ist auch ein weltweites Geoengineering-Chaos. Unterschiedliche Akteure säen Wolken und dimmen die Sonne, unkoordiniert und mit unterschiedlichen Methoden auf mehreren Kontinenten.

Die DARPA, der Forschungsarm des US-amerikanischen Militärs, hat 2022 ein Programm zur Aufdeckung von sogenanntem »rogue geoengineering« aufgesetzt.<sup>3</sup> Die USA möchten offenkundig wissen, wenn irgendwo auf der Welt jemand mit dem Klima herumspielt. Wie werden die USA reagieren, wenn Indien im Jahr 2035 nach mehreren Hitzewellen mit Millionen Hitzetoten den Versuch unternimmt, in Südasien die Temperatur zu senken und die Niederschläge zu erhöhen? Und wie könnte die chinesische Regierung auf einen solchen Eingriff reagieren, wenn dieser im Süden Chinas zu noch mehr Hitze- und Dürreperioden führt? Alleingänge im Geoengineering werden geopolitische Konflikte erzeugen. Umgekehrt gilt: Alle Menschen weltweit haben ein gemeinsames Interesse daran, den Klimakollaps zu vermeiden. Klimaschutz ist eines der wenigen Politikfelder, in denen die unterschiedlichen Lager der neuen, multipolaren Weltordnung noch kooperieren. In einem optimistischen Szenario könnte ein neuer Entscheidungsmechanismus für solares Geoengineering wieder zu mehr internationaler Zusammenarbeit führen. Zugegeben, das ist nur ein Hoffnungswert.

## Methadon für Carbon-Junkies

Wissenschaftlich gesichert hingegen ist: Im Unterschied zu allen anderen Klimaschutzmaßnahmen wirkt solare Strahlenmodifikation schnell. Die beste Indikation hierfür geben große Vulkanausbrüche wie der von 1991 in Indonesien, durch den im Folgejahr die weltweite Durchschnittstemperatur um rund 0,5 Grad sank. Den Himmel künstlich mit Schwefel zu verdunkeln, ist schon heute verlockend. Denn wir leben bereits in einer Welt mit rund 1,5 Grad Erwärmung über den vorindustriellen Durchschnittstemperaturen. Doch wie attraktiv wird das Dimmen der Sonne sein, wenn auch die obere Marke des Pariser Abkommens von »deutlich unter zwei Grad« endgültig Geschichte ist und das Erdsystem auf eine Erwärmung von drei Grad zu-steuert? Denn dann drohen die sogenannten Kippelemente im Klimasystem wie Dominosteine zu fallen: Erst schmelzen große Teile des (dann nicht mehr) »ewigen Eises« an den Polen. Dann tauen die Permafrostböden des hohen Nordens auf und lassen Unmengen weiterer Klimagase frei. Was passiert, wenn die Monsune ausbleiben und die Hurrikane sich dramatisch häufen? Und was geschieht, wenn die Atlantische Meridionale Umwälzströmung (AMOC) und mit ihr der Golfstrom zusammenbrechen, wie eine viel beachtete niederländische Studie vom Frühjahr 2024 befürchtet?<sup>4</sup> Welche politischen Mechanismen setzen sich in Gang, wenn Inselstaaten im Meer versunken sind und Bangladesch zu weiten Teilen überflutet ist? Wenn Teile Zentralafrikas und Südasiens unbewohnbar werden und der Migrationsdruck auf die nördliche Hemisphäre stetig zunimmt? Wenn die Anzahl der Todesopfer durch Flutschäden immer weiter steigt und die Nahrungsmittelsicherheit im Globalen Süden noch weiter sinkt? Vielleicht beginnt ja dann das »Climate Endgame«, der Überlebenskampf der Menschheit, den der

Risikoforscher Luke Kemp vom Center for the Study of Existential Risk an der University of Cambridge befürchtet.<sup>5</sup>

Dieses Horrorszenario ist leider kein pessimistisches Gedankenspiel für Freunde dystopischer Romane. Mit Fortführung der aktuellen Klimapolitik des Pariser Abkommens wird sich die Erde bis Ende des Jahrhunderts voraussichtlich um 2,5 bis 2,9 Grad erwärmen.<sup>6</sup> Das setzt allerdings voraus, dass es zu keinen Rückschlägen bei der Dekarbonisierung kommt, zum Beispiel durch populistische Regierungen, die aus dem Abkommen wieder austreten. Laut dem Emissions Gap Report des UNEP müssten die Klimagasemissionen in den kommenden fünf Jahren um mindestens 28 Prozent sinken, um die Chance zu wahren, die Klimaerwärmung zumindest auf zwei Grad zu begrenzen.<sup>7</sup> Vielleicht geschieht ein Wunder, und die großen Staaten der Welt raufen und reißen sich doch noch zusammen und reduzieren den CO<sub>2</sub>-Ausstoß schneller und radikaler als angekündigt. Doch wie wahrscheinlich ist das? 2023 war ein Jahr mit einem doppeltem Negativrekord. Es war das heißeste Jahr seit rund 120 000 Jahren.<sup>8</sup> Dennoch hat die Menschheit mehr fossile Energieträger verbrannt als je zuvor. Alle Verantwortlichen der Klimapolitik wissen das natürlich. Aber nahezu alle tun so, als ob die Pariser Klimaziele weiter erreichbar sind, wenn die Menschheit bei der Dekarbonisierung nur mal ordentlich in die Hände spuckt. Europa gefällt sich hier in der Rolle des Vorreiters bei notorischer Überschätzung seines Beitrags zum globalen Klimaschutz. Ist dieser demonstrative Zweckoptimismus seltsam naiv oder zynisch-defätistisch? Oder ist er schlicht und einfach dumm und verantwortungslos gegenüber kommenden Generationen?

Im kommenden Jahrzehnt wird die Forderung nach solarem Geoengineering in vielen Ländern der Erde politischer Mainstream sein. Früher oder später wird dann eine Regierung, eine Staatenkoalition oder ein nicht staatlicher Akteur vorsehen

und die Stratosphäre vernebeln. Es ist deshalb höchste Zeit, dass Wissenschaft und Öffentlichkeit, Politik und internationale Klimagremien systematisch die drei zentralen Fragen des solaren Geoengineering klären:

1. Mit welchen technischen Ansätzen ließe sich die Sonne effektiv und sicher dimmen?
2. Mit welchen Risiken und Nebenwirkungen wäre solares Geoengineering verbunden? Besonders wichtig in diesem Zusammenhang sind nicht nur die geophysikalischen Unsicherheiten, sondern vor allem die politischen und gesellschaftlichen.
3. Wie kann sich die (überwiegende Mehrheit der) Menschheit auf einen effektiven Entscheidungsmechanismus für oder gegen einen Einsatz einigen, und welchen Rechtsrahmen braucht es dafür?

Dieses Buch gibt erste Antworten auf diese Fragen. Es wird für diese Antworten kritisiert werden. Ich werde mich dem Vorwurf aussetzen, mich für eine Größenwahnsinnige Scheinlösung starkzumachen, die aktuelle Klimapolitik untergräbt. Ich freue mich auf die Auseinandersetzungen, sofern sie mit und auf Grundlage von natur-, sozial- und wirtschaftswissenschaftlichen Argumenten ausgetragen werden. Im Vorgriff auf die Diskussionen bitte ich darum, folgenden Hinweis zu beachten, der auf jede Packungsbeilage für solares Geoengineering gehört:

Die Sonne zu dimmen, ist das Methadonprogramm einer CO<sub>2</sub>-süchtigen Menschheit: Es ist billig und wirkt schnell, bietet aber leider keine langfristige Lösung. Es behebt die Ursachen des Klimawandels nicht. Stattdessen drohen in der Tat eine Reihe negativer Rebound-Effekte. Es wäre großartig, wenn die Menschheit auf solares Geoengineering verzichten könnte und den Klimawandel in den Griff bekäme, bevor die Welt aus den Fugen gerät. Nur

daran glaube ich nicht mehr. In einem realistischen Szenario kann eine Abschattung der Erde uns in einer Übergangszeit helfen, endgültig vom Kohlenstoff loszukommen, und zugleich die schlimmen Klimafolgen in der Phase des Entzugs abmildern. Nicht mehr und nicht weniger. Langfristig müssen wir Carbon-Junkies unsere Sucht besiegen. Wie kann dieser Balanceakt gelingen?

## Mächtige Technik und menschliche Makel

Die Injektion von Aerosolen in hohe Luftschichten (die sogenannte Stratospheric Aerosol Injection, kurz SAI) scheint aus heutiger Sicht der technisch vielversprechendste Ansatz zu sein. Doch es ließen sich auch mehr Wolken über dem Meer künstlich bilden oder sogenannte Cirruswolken großflächig auflösen. Damit könnte wieder mehr Wärme aus dem Treibhaus Erde entweichen, denn die Zirren behindern die Wärmeabstrahlung zurück ins All. Auch Sonnensegel im Weltraum sind theoretisch denkbar, mit denen sich die Sonneneinstrahlung nach Bedarf reduzieren ließe, möglicherweise sogar regional differenziert. Vielleicht könnte man die Erde gar mit Mondstaub einnebeln.

Das größte Risiko des solaren Geoengineering liegt nicht in der Technik, sondern im menschlichen Makel, nämlich unserer Fähigkeit zur Selbsttäuschung und unserem Hang zu bequemen Ausreden. Im Kontext solares Geoengineering lautet die bequeme Ausrede: Wir haben eine technische Lösung, also müssen wir unser Verhalten nicht ändern. So argumentierte Newt Gingrich als ehemaliger Chef der Republikaner im US-Repräsentantenhaus schon in den 2000er Jahren und wurde dafür mit freundlichem Applaus der amerikanischen Öl- und Gasindustrie bedacht.<sup>9</sup> KlimaökonomInnen nennen diese Gefahr den »moral hazard of geo-engineering«. Aus spieltheoretischer Sicht ist hier eine gesteigerte



Form des Trittbrettfahrereffekts gegeben. Akteure könnten, ohne daran beteiligt zu sein, von Geoengineering profitieren und dabei gleichzeitig weiter CO<sub>2</sub> produzieren, ohne die Konsequenzen ihres schädlichen Verhaltens am eigenen Leib zu spüren. Die Sonne als Übergangsmaßnahme zu dimmen, ergibt nur Sinn, wenn alle (wichtigen) Beteiligten verstehen, dass eine Zwischenlösung keine Lösung ist, sondern ein Ansporn, die gewonnene Zeit zu nutzen, um mit aller Kraft eine tatsächliche Lösung zu erreichen.<sup>10</sup> Bei einem leckgeschlagenen Boot reicht es nicht aus, das Loch notdürftig zu stopfen, wenn man mit diesem noch um die Welt segeln möchte.

Aus Dilemmata gibt es keine Auswege, zumindest keine konventionellen. Eine pragmatische Lösung zur Minderung des »moral hazard« könnte wie folgt aussehen: So viele Akteure wie möglich verpflichten sich in einem internationalen Abkommen darauf, Geoengineering ausschließlich als Möglichkeit zu verstehen und einzusetzen, um mehr Zeit für den Prozess der Dekarbonisierung zu gewinnen. Sie einigen sich auf eine Begrenzung des technischen Eingriffs auf beispielsweise zwei Grad Erwärmung (sogenanntes »Peak Shaving«) oder auf ein dynamisches Absenken der zusätzlichen Erwärmung um 50 Prozent. Gleichzeitig verpflichten sich die »Vereinten Geoengineering-Nationen« darauf, die grünen Energien schneller und konsequenter auszubauen – was 2040, wenn die grüne Energie nahezu überall auf der Welt billiger sein wird als die fossile, leichterfallen wird als heute. Im Idealfall ist Energie dann »too cheap to meter«, also so günstig, dass es sich gar nicht mehr lohnt, sie abzurechnen. Dies ist keine technische Utopie, sondern bereits heute in sonnenreichen Regionen möglich. Die großen Solarkraftwerke der arabischen Halbinsel produzieren die Kilowattstunde Strom für rund einen Cent. Da lohnt der Stromzähler nicht mehr.<sup>11</sup> Mit einem Überfluss an grüner Energie wiederum entsteht die Chance, den CO<sub>2</sub>-Anteil

in der Atmosphäre mit energiehungrigen Extraktionsverfahren, dem sogenannten »Carbon Dioxide Removal« (CDR), schrittweise abzusenken – mindestens auf das heutige Niveau von 420 ppm (parts per million). Innerhalb mehrerer Jahrzehnte könnte die Kohlendioxidkonzentration vielleicht wieder auf ihr vorindustrielles Niveau von rund 270 ppm abgesenkt werden. Damit wäre die frühere Balance von Energieeintrag durch Sonnenlicht und Abstrahlen von Wärme aus der Atmosphäre ins All (durch Infrarotwellen) wieder hergestellt.

Meine Schlussfolgerung lautet: Es ist wahrscheinlich, dass die Menschheit, gemessen am aktuellen Entwicklungspfad, bald in einer Welt mit mehr als zwei Grad Celsius über dem vorindustriellen Niveau leben wird. Dass unsere Kinder und Enkel mit drei Grad Erwärmung werden leben müssen, ist ein trauriges, aber plausibles Szenario. Je schlimmer die Klimafolgen und je größer das daraus entstehende Leid, desto höher wird die Wahrscheinlichkeit eines erratischen, unkontrollierten Einsatzes von solarem Geoengineering. Die Klimaverantwortlichen in Politik und die Klimakundigen in der Wissenschaft müssen das wohlgemeinte Schweigegelübde zu einer mächtigen Technologie brechen, auch wenn oder gerade weil sie wie alle mächtigen Technologien ein zweiseitiges Schwert ist. Ob sie mehr nützt als schadet, hängt davon ab, wer sie wie und mit welchem Ziel einsetzt. Solares Geoengineering wird vermutlich schon im nächsten Jahrzehnt systematisch betrieben werden und nicht als PR-Stunt von einem Start-up wie Make Sunsets. Ziel muss es sein, die Sonne wissenschaftlich kompetent und politisch verantwortlich zu dimmen. Solares Geoengineering ist nicht zu schön, um wahr zu sein. Die Methode ist nicht schön. Aber wahr ist: Die Menschheit kann sich mit ihr die notwendige Zeit erkaufen, den Übergang in eine post-fossile Welt zu gestalten.

## 2

### Klima: Warum wir die Sonne dimmen müssen

#### Wet-Bulb-Horror

Der Begriff »Kühlgrenztemperatur« klingt sehr technisch. Physikalisch beschreibt er die tiefste Temperatur, die sich bei einer bestimmten Luftfeuchtigkeit durch Verdunstung erreichen lässt. Biologisch, für uns Menschen, ist der Wert wichtiger als die bloße Lufttemperatur. Er ist eine Frage des Überlebens. Mit 38 Grad Celsius bei trockener Luft kommt unser Körper deutlich besser zurecht als mit 30 Grad bei sehr hoher Luftfeuchtigkeit. Solange geringe Luftfeuchtigkeit herrscht, hilft die Physik unserer Biologie. Bei Hitze schwitzen wir und gehen in den Schatten, wir hoffen auf kühlenden Wind oder machen einen Ventilator an. Die Verdunstung des Schweißes senkt die Körpertemperatur erheblich. Die Kühlgrenztemperatur lässt sich mit einem klassischen Thermometer und einem feuchten Tuch messen. Das Tuch wird um die Glaskugel am unteren Ende des Thermometers gewickelt. Bei 100 Prozent Luftfeuchtigkeit sind Lufttemperatur und Kühlgrenztemperatur gleich. Je trockener die Luft, desto tiefer sinkt die Temperatur dank der Verdunstungsmöglichkeit. Bei 30 Prozent relativer Luftfeuchte und 45 Grad Lufttemperatur beträgt die Kühlgrenztemperatur »nur« 28 Grad, bei 90 Prozent Wasserdampf sind es dagegen rund 43 Grad.