

# RISKANTE KÜHLUNG

TEXT: TIM SCHRÖDER

Vulkane als Ideengeber: Bei ihren Ausbrüchen stoßen sie große Mengen an Schwefeldioxid aus und kühlen so das Klima. Als ein Mittel des Geoengineerings diskutieren Fachleute daher, die Erderwärmung durch gezielte Freisetzung des Gases einzudämmen. Ob das funktionieren könnte und welche Gefahren damit verbunden wären, untersucht Ulrike Niemeier vom Max-Planck-Institut für Meteorologie in Hamburg.

Der Ausbruch des Pinatubo war gewaltig. Als der philippinische Vulkan im Juni 1991 seine Kuppe absprengte, erhob sich eine gigantische Aschewolke in den Himmel. Sie tauchte die Insel Luzon mitten am Tage in Finsternis. Auf eine Fläche von der Größe Baden-Württembergs, Bayerns und Hessens zusammen regneten Unmengen von Asche herab. Sie begrub Straßen und Gebäude unter einer teils meterhohen Schicht. Hunderte Menschen starben, Zehntausende verloren ihr Zuhause. Die Eruption war so stark, dass Asche

und Gase bis in die Stratosphäre gerissen wurden, dreimal so hoch, wie Verkehrsflugzeuge fliegen. Stundenlang bebte der Berg. In dieser Zeit spuckte er acht Millionen Tonnen Schwefeldioxid aus. In nur wenigen Tagen verteilte sich das Gas mit den weiträumigen Luftströmungen in der Stratosphäre über die gesamte Nordhalbkugel. Und das führte zu einem interessanten Phänomen: Auf der Erde wurde es kühler.

Die Ursache dieses Kühleffekts ist schon lange bekannt. Schwefeldioxid reagiert in der Atmosphäre mit der Luftfeuchtigkeit zu Schwefelsäure, aus der sich Schwefelsalzpartikel bilden, sogenannte Sulfatpartikel. Diese schweben für gewisse Zeit in der Luft und reflektieren einen Teil der Sonnenstrahlung, die auf die Erde trifft. Damit bewirken sie eine Abkühlung der darunterliegenden Schichten der Atmosphäre. Kein Wunder also, dass die Eruption des Pinatubo, einer der

stärksten Vulkanausbrüche im vergangenen Jahrhundert, für die Klimaforschenden interessant ist.

„Dieser Ausbruch hat eindrücklich gezeigt, dass der Eintrag von Schwefeldioxid in die Atmosphäre einen messbaren Effekt hat“, erläutert Ulrike Niemeier, Wissenschaftlerin am Max-Planck-Institut für Meteorologie in Hamburg. Niemeier widmet sich schon seit Jahren der Frage, wie das Schwefeldioxid und die Asche, welche Vulkane ausstoßen, die Erdatmosphäre beeinflussen. Um die Klimawirkung besser zu verstehen, arbeitet sie vor allem mit Modellrechnungen. Dabei beschäftigt sie sich auch mit den großen vorgeschichtlichen Eruptionen, den Ausbrüchen sogenannter Supervulkane, die ein Vielfaches der Sprengkraft des Pinatubo hatten. Die Eruptionen des Yellowstone-Vulkans vor etwa zwei Millionen Jahren beispielsweise, bei denen rund 200-mal mehr Masse empor-

FOTO: PICTURE ALLIANCE / ASSOCIATED PRESS | ICHIRO OHARA



Blaupause fürs Climate-Engineering: Aktive Vulkane wie der Nishinoshima, 1000 Kilometer südlich von Tokio, setzen riesige Mengen Schwefeldioxid frei. Aus dem Gas bilden sich in der Atmosphäre Schwebeteilchen, die Sonnenlicht reflektieren.

Richtungswechsel in der Forschung: Ulrike Niemeier beschäftigt sich mit der Klimawirkung von Vulkanausbrüchen, untersucht jetzt aber verstärkt, welche Wirkung die Impfung der Erdatmosphäre mit Schwefeldioxid hätte.



FOTO: TOM FENIGEL FÜR MDR

geschleudert wurde als 1991 durch den Pinatubo. Mittels Computermodellen hat Niemeier berechnet, wie sich diese gigantischen Mengen in der Erdatmosphäre verteilt haben könnten – wie sich diese dadurch abkühlte und letztlich das Weltklima änderte.

Der Kühleffekt des vulkanischen Schwefeldioxids hat dazu geführt, dass Ulrike Niemeier im Laufe der vergangenen 15 Jahre von ihrem eigentlichen Thema, der Rolle von Vulkanen im Klima, immer weiter in eine andere Richtung der Klimaforschung vorgedrungen ist. Denn seit die Erde sich durch den menschengemachten Klimawandel erwärmt, wird immer öfter die Frage laut, ob sie sich nicht vielleicht künstlich kühlen ließe. Einer der Ersten, die diese Idee skizzierten, war der Atmosphärenchemiker Paul Crutzen, viele Jahre lang Direktor am Max-Planck-Institut für Chemie in Mainz. Crutzen veröffentlichte 2006 einen provokanten Fachartikel. Angesichts der permanent wachsenden Kohlendioxid-Emissionen stellte er darin die Frage, ob die Menschheit künftig technisch in das Klima eingreifen müsse, um die schlimmsten Folgen des Klimawandels abzumildern. Für dieses Klempnern am Klima kamen damals die Begriffe Geoengineering beziehungsweise

Climate-Engineering (CE) auf. Darunter fassen Experten mittlerweile zahlreiche verschiedene technische Ansätze zusammen. Im Groben werden zwei Arten von gezielten Eingriffen ins Klima unterschieden: Auf der einen Seite gibt es das Carbon Dioxide Removal (CDR) und auf der anderen Seite das Strahlungsmanage-

ment. Das CDR hat das Ziel, Kohlendioxid aus der Luft zu entfernen und das Gas für lange Zeit zu binden oder sicher zu verwahren. Die Aufforstung von riesigen, bislang unbewaldeten Gebieten ist dafür ebenso im Gespräch wie die Düngung des Meeres mit Eisen, um das Algenwachstum anzukurbeln. „Am realistischsten

## Aerosole könnten die Erwärmung bremsen

Immerhin löste Paul Crutzens Artikel ein großes wissenschaftliches Interesse am Climate-Engineering aus. Die Niederländer arbeiten bereits daran, sie umzusetzen: Im Rahmen des Projekts Porthos soll im Hafen von Rotterdam über die kommenden Jahre eine Pipeline entlang der Raffinerien, Kraft- und Zementwerke verlegt werden, in welche das Kohlendioxid aus den Abgasen eingespeist wird. Über die Pipeline wird das Kohlendioxid dann in eine ausgediente Erdgaslagerstätte unter der Nordsee gepumpt.

## Eine umstrittene Idee

Zur zweiten Kategorie des Climate-Engineerings zählen Methoden, die den Wärmehaushalt der Erde direkt verändern: das sogenannte Strahlungsmanagement. Eine besonders kühne Idee dieses Solar Radiation Management (SRM) sah vor, die Erde mit gewaltigen Sonnenschirmen im All abzuschatten – ein Plan, der bis heute eher als Science-Fiction gilt. Es geht aber auch eine Nummer kleiner: So könnten beispielsweise Flugzeuge in der Atmosphäre Partikel verstreuen, die einen Teil der Sonnenstrahlung ins Weltall zurückwerfen. Paul Crutzen sah sich für diese Idee jedoch einem Sturm der Entrüstung ausgesetzt. Es sei generell Hybris, den Strahlungshaushalt der Erde mit technischen Mitteln verändern zu wollen. Auch seien die Folgen eines derart massiven Eingriffs für das Klima in den verschiedenen Regionen der Erde unkalkulierbar. Das sieht auch Ulrike Niemeier nach vielen Jahren der Forschung so. „Während man mit CDR nur die Kohlendioxidkonzentration in der Atmosphäre verringert, beeinflusst man mit dem Strahlungsmanagement weltweit die Menge an Sonnenenergie, die auf die Erdoberfläche trifft.“

„Zusammen mit Kolleginnen und Kollegen haben wir damals versucht, die Frage zu beantworten, ob man das Aufheizen der Erde durch den Klimawandel mit Schwefeldioxid theoretisch kompensieren könnte“, erzählt Niemeier. Diese Studien waren Teil eines großen, von ihrem Kollegen Hauke Schmidt geleiteten EU-Projekts mit dem Namen Implice, das „Bedeutung und Risiken von neuen Optionen zur Begrenzung des Klimawandels“ untersuchte. Die Ergebnisse waren eindeutig – und wurden, ähnlich wie Crutzens Fachartikel, kontrovers diskutiert: Ja, tatsächlich könnte man die Erderwärmung kompensieren – sogar beim schlimmsten Szenario, das der Weltklimarat entwirft, dem RCP8.5. Bei diesem Szenario des *business as usual* steigen die CO<sub>2</sub>-Emissionen auch in den nächsten Jahren immer weiter an. Mit Schwefeldioxid-Injektionen im ganz großen Stil könne man das Tempera-

turniveau des Jahres 2020 halten, haben die Implice-Partner errechnet. „Das Klima würde im weltweiten Durchschnitt milder bleiben“, sagt Ulrike Niemeier. „Allerdings würde es im globalen Mittel etwas weniger regnen.“

## AUF DEN PUNKT GEBRACHT

Geo-beziehungsweise Climate-Engineering gilt als eine Möglichkeit, den menschengemachten Klimawandel aufzuhalten – sei es durch Aufforstung, durch unterirdische Speicherung von Kohlendioxid, durch Eisendüngung des Meeres oder durch Verschattung der Erde mit Sulfatpartikeln, die aus Schwefeldioxid entstehen.

Modellrechnungen zufolge ließe sich die globale Durchschnittstemperatur ohne Reduktion der Treibhausgasemissionen auf dem Niveau von 2020 halten, wenn jährlich fünf- bis achtmal so viel Schwefeldioxid in die Atmosphäre gebracht würde, wie im Jahr 1991 beim Ausbruch des Vulkans Pinatubo frei wurde.

Der geringere Energieeintrag von der Sonne würde den Rechnungen zufolge große Luftströmungen etwa in den Tropen stören, mit unabsehbaren Folgen für das globale Klima. Die Aerosole, die sich aus Schwefeldioxid bilden, dürften im globalen Mittel zudem die Niederschlagsmenge reduzieren. Das könnte auch Konflikte zwischen Staaten auslösen, die das Gas eigenmächtig freisetzen beziehungsweise unter einer Reduktion des Niederschlags leiden.

Doch in der Praxis dürfte das schwierig werden. „Wenn wir bis zum Jahr 2100 trotz steigender CO<sub>2</sub>-Emissionen das Klima von 2020 allein mithilfe von Schwefeldioxid halten wollten, dann müsste die Menschheit jährlich fünf- bis achtmal so viel Schwefeldioxid in die Stratosphäre bringen, wie 1991 beim Ausbruch des Pinatubo frei wurde“, sagt Niemeier. Das wäre

aberwitzig. Eine japanische Forschergruppe kam zu ähnlichen Ergebnissen und hat errechnet, dass täglich 6700 Flugzeuge Schwefeldioxid in der Stratosphäre verteilen müssten, um die Erderwärmung um ein einziges Grad Celsius zu senken – zum Vergleich: Am Flughafen Heathrow in London gibt es in Spitzenzeiten rund 1200 Starts pro Tag. Ulrike Niemeier betont zudem, dass die Schwefeldioxid-Einträge erhebliche Nebenwirkungen hätten. Der Himmel würde

künftig nicht mehr strahlend blau, sondern eher milchig sein. Weltweit würden die Niederschläge im Durchschnitt abnehmen, der Monsun und große Luftströmungen in der Atmosphäre würden sich ändern, weil man am solaren Energieeintrag schraubte. In den Tropen würde die Sonneneinstrahlung stärker sinken als an den Polen, damit würde sich auch das Temperaturgefälle zwischen beiden Regionen vermindern, sodass sich die Luftströmungen abschwächen könn-

ten. Unter den großen stratosphärischen Luftströmungen in den Tropen, die betroffen wären, ist die Quasi-Biennial Oscillation, kurz QBO. Alle zwei Jahre wechselt sie ihre Richtung von West nach Ost und zurück. Was damit passieren würde, hat Ulrike Niemeier untersucht, indem sie ihr Aerosolmodell mit dem großen Klimamodell des Max-Planck-Instituts für Meteorologie namens MPI-ESM koppelte. „Die Berechnungen zeigen ganz deutlich, dass eine

Schwefeldioxid-Injektion in großer Dimension zum Zusammenbrechen der QBO führen würde“, sagt die Wissenschaftlerin. „Welche Konsequenzen das für das Weltklima hätte, können wir noch gar nicht absehen.“

Andreas Oschlies vom Forschungszentrum GEOMAR in Kiel hält solche Arbeiten wie die von Ulrike Niemeier für wegweisend. „Sie ist eine der A1-lerersten, die im Detail die chemisch-physikalischen Vorgänge in der Stra-

tosphäre analysiert haben“, sagt der Experte für Climate-Engineering. „Sie hat eine quantitative, belastbare Datengrundlage geliefert, um das zukünftige Klima, das wir durch diese Art von Climate-Engineering erzeugen würden, richtig zu berechnen.“ Entscheidend sei zum Beispiel die Erkenntnis gewesen, dass Sulfatpartikel mit der Zeit verklumpen. Es hilft also nichts, immer mehr Sulfat in die Stratosphäre zu pumpen, weil die Aerosole dann nur umso stärker ver-

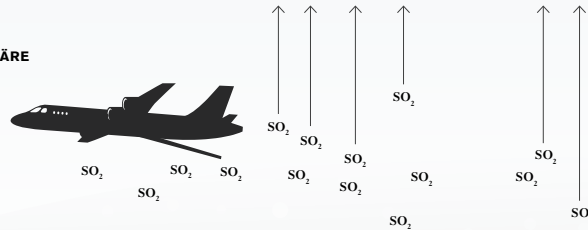
klumpen und absinken. Irgendwann tritt gewissermaßen eine Sättigung ein, ganz gleich, wie viel Sulfat die Flugzeuge versprühen. „Niemeiers Erkenntnisse waren essenziell, damit wir einschätzen können, inwieweit diese Art von Strahlungsmanagement überhaupt funktionieren könnte“, sagt Oschlies. Ulrike Niemeier hat außerdem die Wirkung verschiedener Vorgehensweisen beim Freisetzen von Schwefeldioxid analysiert, ob es beispielsweise effektiver wäre, das



METHODEN DES GEOENGINEERINGS

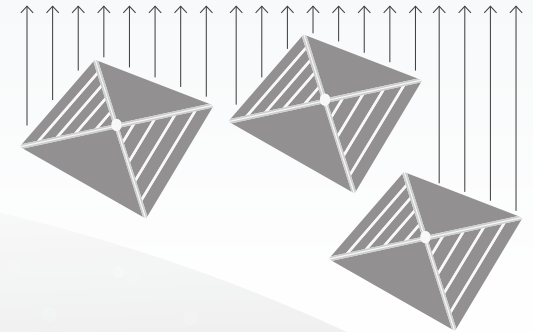
**AEROSOLE IN DER ATMOSPHÄRE**

Flugzeuge, Ballone oder Drohnen bringen zum Beispiel Schwefeldioxid in die Stratosphäre. Dort bilden sich Partikel, die einen Teil des Sonnenlichts reflektieren.



**SONNENSCHIRME IM ALL**

Unzählige Spiegel oder Linsen werden als eine Art Sonnenschirm in eine stabile Erdumlaufbahn gebracht. Sie lenken einen Teil des Sonnenlichts von der Erde weg.



**CO<sub>2</sub>-ABSCHEIDUNG UND -SPEICHERUNG**

Das Treibhausgas wird aus den Abgasen etwa von Kraft- und Zementwerken abgetrennt und in ehemalige Erdöl- und Erdgasstätten oder tiefe Grundwasserleiter gepumpt.

**DIREKTEINFANG VON CO<sub>2</sub>**

Riesige Filter entziehen der Luft CO<sub>2</sub>, das dann unterirdisch gespeichert wird.

UNTERIRDISCHER CO<sub>2</sub>-SPEICHER

UNTERIRDISCHER CO<sub>2</sub>-SPEICHER

**AUFFORSTUNG**

Pflanzen, vor allem Bäume, binden CO<sub>2</sub> und entziehen dieses so der Atmosphäre.

**EISENDÜNGUNG IM OZEAN**

Eisensulfat wirkt als Mikro-nährstoff für Algen, die dadurch vermehrt wachsen und CO<sub>2</sub> aufnehmen. Sobald sie absterben, sinken sie auf den Meeresboden.

Gas täglich in der Stratosphäre zu verströmen oder eher in bestimmten Abständen. Ein Ergebnis: Die Partikel verklumpen weit weniger, wenn man einen Monat lang große Mengen in die Stratosphäre bringt, als wenn man täglich nachliefert. Entscheidend für die Kühlwirkung sei es auch, an welchen Orten auf der Erde man das Schwefeldioxid freisetzt. Die Modelle deuten darauf hin, dass Injektionen an mehreren Punkten rund um die Tropen die allergrößte Wirkung hätten.

Das klingt fast so, als hätten Niemeier und andere Experten bereits einen Climate-Engineering-Masterplan ausgetüftelt. Doch nichts läge ihr ferner als das, sagt Ulrike Niemeier. „Um den Klimawandel zu stoppen,

gibt es für mich eigentlich nur den einen Weg: den CO<sub>2</sub>-Ausstoß so schnell wie möglich zu verringern. Denn eines ist klar. Das Strahlungsmanagement wäre nur ein Herumdoktern an den Symptomen – gegen das eigentliche Problem, das Kohlendioxid, richten wir damit nichts aus.“ Dennoch sei es wichtig, das Climate-Engineering zu erforschen. Denn sollte sich das Klima einmal sehr schnell extrem verändern, könnten Maßnahmen des Klimamanagements irgendwann als Notfalloption doch noch auf die politische Agenda kommen – als das kleinere Übel im Vergleich zu massiven Klimafolgen. „Insofern sollten wir sehr genau wissen, worauf wir uns einlassen.“ Auch sei nicht auszuschließen, dass irgendwann in diesem Jahrhundert einzelne

Nationen auf eigene Faust ins Climate-Engineering einsteigen – ohne sich mit der weltweiten Staatengemeinschaft abzustimmen. Politisch wäre das ein Fiasko, weil davon die ganze Welt betroffen wäre. Ein Alleingang einzelner Staaten oder einer kleinen Gruppe von Staaten dürfte damit zu Konflikten führen, etwa wenn sich in anderen Ländern die Niederschläge verringern. Eines der interessantesten Projekte für Ulrike Niemeier war daher auch das Projekt Ceibal, in dem sie zusammen mit Hauke Schmidt sowie mit Juristen, Politik- und Wirtschaftswissenschaftlern, aber auch Philosophen untersucht hat, ob und wie das Climate-Engineering international einheitlich geregelt werden könnte. Im Vordergrund stand die Frage, ob man einzelne Staaten für

Schäden haftbar machen könnte, die diese durch Climate-Engineering-Maßnahmen verursachen.

Für Ceibal versuchte Ulrike Niemeier aus den Modellergebnissen abzuleiten, wo es weltweit Gewinner und Verlierer von Climate-Engineering-Maßnahmen geben könnte. „Es ist aber ungeheuer schwierig, Schäden kausal auf eine Climate-Engineering-Maßnahme zurückzuführen“, sagt sie.

„Als Beispiel hatten wir eine fünfwöchige Dürre in Polen und die Frage, ob Climate-Engineering-Maßnahmen in Australien schuld sind.“ Eine eindeutige Antwort konnte sie nicht liefern. „Aber es war ungeheuer spannend, mit den Experten aus den anderen Disziplinen zusammenzuarbeiten und dabei eine gemeinsame Sprache und Verständnis für die anderen zu entwickeln.“ Deutlich wurde, dass es heute schwierig wäre, einen Staat für eine Climate-Engineering-Maßnahme zu verklagen. Ein solcher Fall ist ja noch niemals vor einem Gericht der Welt verhandelt worden. Welche Institution wäre zuständig? „Insofern hat das

Thema Climate-Engineering für mich eine wichtige politische Komponente“, sagt Ulrike Niemeier. „Sollte man Climate-Engineering tatsächlich jemals in Erwägung ziehen, wird die Menschheit sehr aufpassen müssen, um nicht in Kriege zu schlittern. In jedem Falle sollte man sich zuvor international über die Haftungsfrage abstimmen.“

Die Zusammenarbeit im Projekt Ceibal und auch die langjährige Kooperation mit anderen Klimaforschenden hat der Aerosolexpertin Ulrike Niemeier gezeigt, wie wichtig der Austausch mit Kolleginnen und Kollegen aus anderen Fachrichtungen ist. „Ob es jemals zum Einsatz von Climate-Engineering kommen wird, das wissen wir nicht“, sagt die Wissenschaftlerin. „Dennoch sollten wir gut darauf vorbereitet sein und uns vor allem der Risiken bewusst werden.“

## GLOSSAR

**AEROSOLE**  
sind wenige Nanometer bis mehrere Mikrometer große Schwebeteilchen etwa in der Atmosphäre. Sie reflektieren Sonnenstrahlen, bilden aber auch die Keimzellen für Wolkenröpfchen.

**STRAHLUNGSMANAGEMENT**  
ist eine Art des Climate-Engineerings, bei der die Erde etwa mit Sulfataerosolen gegen einen Teil des Sonnenlichts abgeschirmt werden soll.



**Historischer Kühleffekt:** Ulrike Niemeier hat berechnet, wie sich die Schwefeldioxidwolke, die nach dem Ausbruch des Yellowstone-Vulkans vor etwa zwei Millionen Jahren entstand, über die Erde verteilt haben dürfte. Demnach bedeckte sie nach elf Tagen bereits große Teile der Nordhalbkugel. Nach etwa einem Monat verhüllte sie nahezu die ganze Nordhalbkugel.

Von Chemikern für Chemiker –  
Nutzen Sie das Netzwerk –  
der GDCh:

- ➔ Stellenmarkt – Online und in den *Nachrichten aus der Chemie*
- ➔ CheMento – das Mentoring Programm der GDCh für chemische Nachwuchskräfte
- ➔ Publikationen rund um die Karriere
- ➔ Bewerbungseminare und -workshops
- ➔ Jobbörsen und Vorträge

