

**Spektrum**  
DER WISSENSCHAFT

**KOMPAKT**

Strategien gegen die globale Erwärmung

# KLIMASCHUTZ

**Klimapolitik**

Hoffnung und  
heiße Luft

**Geoengineering**

Was ist möglich –  
und was erlaubt?

**Forstwirtschaft**

Dem Wandel  
gewachsen



Daniel Lingenhöhl  
E-Mail: [lingenhoehl@spektrum.de](mailto:lingenhoehl@spektrum.de)

Liebe Leserin, lieber Leser,  
alle Jahre wieder trifft sich die Weltgemeinschaft und diskutiert, wie die Menschheit den Klimawandel vielleicht doch noch eindämmen könnte. Während der Konferenzen wird viel heiße Luft produziert, dabei gibt es schon zahlreiche Ansätze zum Klimaschutz – traditionelle wie Bäume pflanzen und technologische wie erneuerbare Energien. Und es werden Lösungen diskutiert, die sich beweisen müssen oder die Eingriffe ins Erdsystem womöglich sogar noch verschlimmern wie das Geoengineering. Sicher ist nur, dass etwas getan werden muss.

Packen wir es also an, meint

Erscheinungsdatum dieser Ausgabe: 11.07.2016

Folgen Sie uns:



**CHEFREDAKTEURE:** Prof. Dr. Carsten Könneker (v.i.S.d.P.), Dr. Uwe Reichert  
**REDAKTIONSLEITER:** Christiane Gelitz, Dr. Hartwig Hanser, Dr. Daniel Lingenhöhl  
**ART DIRECTOR DIGITAL:** Marc Grove  
**LAYOUT:** Oliver Gabriel  
**SCHLUSSREDAKTION:** Christina Meyberg (Ltg.), Sigrid Spies, Katharina Werle  
**BILDREDAKTION:** Alice Krüßmann (Ltg.), Anke Lingg, Gabriela Rabe  
**PRODUKTMANAGERIN DIGITAL:** Antje Findeklea  
**VERLAG:** Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Tiergartenstr. 15-17, 69121 Heidelberg, Tel. 06221 9126-600, Fax 06221 9126-751; Amtsgericht Mannheim, HRB 338114, USt-Id-Nr. DE147514638  
**GESCHÄFTSLEITUNG:** Markus Bossle, Thomas Bleck  
**MARKETING UND VERTRIEB:** Annette Baumbusch (Ltg.)  
**LESER- UND BESTELLSERVICE:** Helga Emmerich, Sabine Häusser, Ute Park, Tel. 06221 9126-743, E-Mail: [service@spektrum.de](mailto:service@spektrum.de)

Die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH ist Kooperationspartner des Nationalen Instituts für Wissenschaftskommunikation gGmbH (NaWik).

**BEZUGSPREIS:** Einzelausgabe € 4,99 inkl. Umsatzsteuer  
**ANZEIGEN:** Wenn Sie an Anzeigen in unseren Digitalpublikationen interessiert sind, schreiben Sie bitte eine E-Mail an [anzeigen@spektrum.de](mailto:anzeigen@spektrum.de).

Sämtliche Nutzungsrechte an dem vorliegenden Werk liegen bei der Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH. Jegliche Nutzung des Werks, insbesondere die Vervielfältigung, Verbreitung, öffentliche Wiedergabe oder öffentliche Zugänglichmachung, ist ohne die vorherige schriftliche Einwilligung des Verlags unzulässig. Jegliche unautorisierte Nutzung des Werks berechtigt den Verlag zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer. Bei jeder autorisierten (oder gesetzlich gestatteten) Nutzung des Werks ist die folgende Quellenangabe an branchenüblicher Stelle vorzunehmen: © 2016 (Autor), Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Heidelberg. Jegliche Nutzung ohne die Quellenangabe in der vorstehenden Form berechtigt die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer. Bildnachweise: Wir haben uns bemüht, sämtliche Rechteinhaber von Abbildungen zu ermitteln. Sollte dem Verlag gegenüber der Nachweis der Rechtsinhaberschaft geführt werden, wird das branchenübliche Honorar nachträglich gezahlt. Für unaufgefordert eingesandte Manuskripte und Bücher übernimmt die Redaktion keine Haftung; sie behält sich vor, Leserbriefe zu kürzen.

SEITE  
04

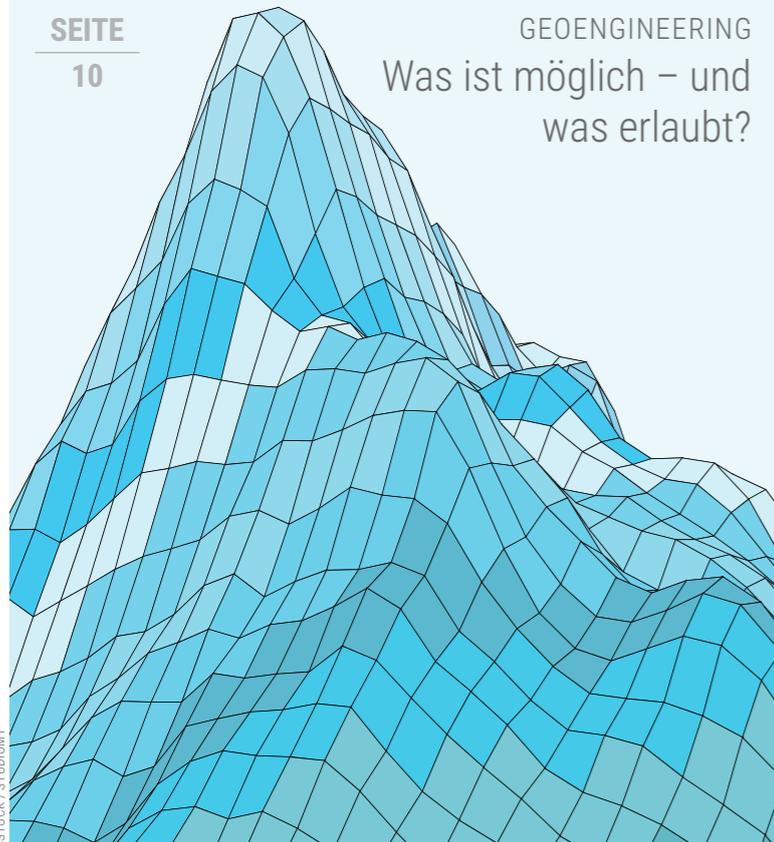
KLIMAGIPFEL VON PARIS  
Mit allen Mitteln?



ISTOCK / BORUT TRDINA

SEITE  
10

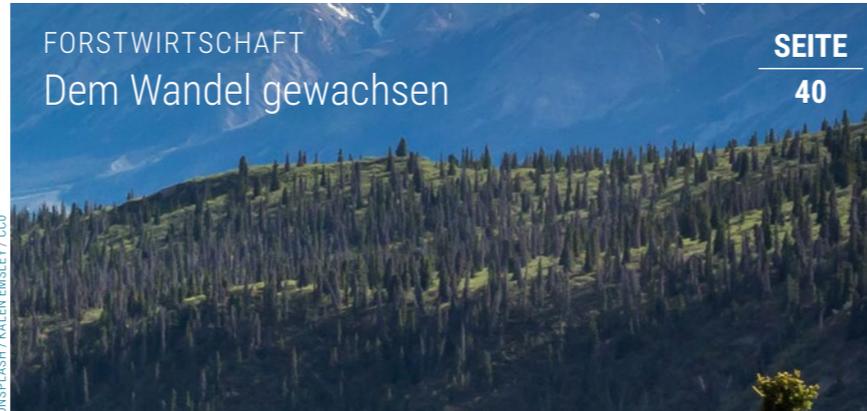
GEOENGINEERING  
Was ist möglich – und  
was erlaubt?



ISTOCK / STUDIO1

FORSTWIRTSCHAFT  
Dem Wandel gewachsen

SEITE  
40



UNSPLASH / KALEN ENSLEY / CCC

KLIMAPOLITIK  
Begrabt das Zwei-Grad-Ziel

SEITE  
65



ISTOCK / ROMOLO TAVANI

- 07 MEINUNG  
Ein Sieg von Vernunft und Diplomatie
- 15 KOHLENSTOFFSEQUESTRIERUNG  
Vulkane versteinern Treibhausgase
- 18 OZEANDÜNGUNG  
Wie gut wirkt die Eisendüngung der Meere?
- 22 SCHWEFELSCHIRM  
Der Irrweg der Klimamanipulation
- 25 KLIMAWANDEL  
In der Hitze der Stadt
- 34 ÖKOSYSTEME  
Wilde Tiere als Klimaschützer
- 51 BIOMASSE  
Wie grün ist die Energie aus dem Wald?
- 58 WÄLDER  
Klimaschutz – leicht gemacht
- 62 ENERGIEPOLITIK  
Kohle muss viel teurer werden
- 71 FORSCHUNG IN ZAHLEN  
Klima & Megastädte
- 73 KLIMAPOLITIK  
Hoffnung und heiße Luft



KLIMAGIPFEL VON PARIS

# Mit allen Mitteln?

von Lars Fischer

Mit dem 1,5-Grad-Ziel im Pariser Klimavertrag werden auch Diskussionen um riskante Verfahren wie Geoen-  
gineering wieder aufflackern,  
kommentiert Lars Fischer.



ISTOCK / BORUT TRDINA



ISTOCK / BORUT TRDINA

**K**aum etwas hat der Klimawandel so verändert wie die politische Großwetterlage. Das zeigt das Verhandlungsergebnis der Pariser Klimakonferenz. Nicht nur, dass die Vertragsparteien die vielleicht letzte Gelegenheit genutzt haben, **ein völkerrechtlich bindendes Dokument als Nachfolger für das Kyoto-Protokoll zu schaffen** – es ist auch alles andere als der kleinste gemeinsame Nenner. Anders als in Kopenhagen ist es dieses Mal der Koalition der Ambitionierten, geführt von der EU und den Regierungen der kleinen Inselstaaten, gelungen, die skeptischen Staaten mit ins Boot zu holen.

Politisch ist der Vertrag ein bemerkenswerter Erfolg, doch die neue Stimmung birgt auch Gefahren. Mit dem nun erstmals festgeschriebenen Ziel, den Anstieg des globalen Temperaturmittels auf unter 1,5 Grad zu begrenzen, werden auch die Diskussionen um Geoengineering und andere drastische Maßnahmen zum Klimaschutz Fahrt aufnehmen. Die Weltgemeinschaft setzt sich quasi selbst die Pistole auf die Brust – sie muss nun liefern.

Liefern um welchen Preis? Die ambitionierten Ziele des Pariser Abkommens le-

gen Methoden nahe, von denen man bisher mit gutem Grund gerne abgesehen hat. Bei den nun folgenden Diskussionen über konkrete Klimaschutzmaßnahmen täte man gut daran, nicht aus den Augen zu verlieren, dass auch der Klimaschutz potenzielle Risiken birgt, nicht zuletzt, wenn man ambitionierte Ziele mit radikalen Maßnahmen zu erreichen sucht.

Klar ist bereits jetzt: Schon für das Zwei-Grad-Ziel brauchen wir wahrscheinlich negative Emissionen im großen Stil – das heißt Techniken, die der Atmosphäre große Mengen Kohlendioxid entziehen. Ein Beispiel eines solchen Verfahrens ist CCS, das so genannte Carbon Capture and Storage. Im Prinzip handelt es sich dabei um eine Weiterentwicklung der Rauchgasentschwefelung, nur dass man eben nicht den Schwefel abfängt, bevor er oben aus dem Schornstein kommt, sondern den Kohlenstoff. Dieses Verfahren ist sogar schon technisch erprobt.

Der Haken an CCS offenbart sich bei näherer Betrachtung. Die viel gelobte Pilotanlage am Kraftwerk Schwarze Pumpe ist seit 2014 außer Betrieb, die Technik kommt jetzt in Kanada zum Einsatz, wo das herausgefilterte Kohlendioxid dankbare Ab-

nehmer findet: Die Ölindustrie verwendet es, um bisher unzugängliches Erdöl aus dem Wirtsgestein zu lösen.

Das ist nicht eben eine ermutigende Bestandsaufnahme. Viele Parteien, an vorderster Front die akut bedrohten Inselstaaten, werden deswegen mit Recht fordern, dass alle Möglichkeiten auf den Tisch kommen, die Erderwärmung zu begrenzen.

Ein zwischenzeitlich aus der Mode gekommenes Verfahren ist die Eisendüngung im Ozean. Damit sollte das Plankton zum Wachsen angeregt werden und so Kohlendioxid aus der Atmosphäre in den Sedimenten der Tiefsee dauerhaft verschwinden. Bis heute ist nicht klar, ob das funktioniert und welche Folgen es für den Ozean hat, wenn man das Verfahren im großen Stil einsetzt.

Für das so genannte Geoengineering gilt das umso mehr: Kühlende Schwefelaerosole in der Stratosphäre, Wolkentürme über dem Ozean, vielleicht darf es auch ein Sonnenschild im Weltall sein? Sie sind nicht erprobt, ihre Folgen sind weitgehend unbekannt – doch ohne sie wird man kaum eine realistische Perspektive haben, den Temperaturanstieg unter den jetzt in Paris vereinbarten 1,5 Grad zu halten.

Darauf werden sich nun jene berufen, die sich für solche Maßnahmen jenseits der bloßen Kohlendioxidreduktion aussprechen. Nicht zuletzt auch solche Parteien, die andere Verfahren nicht nur als Ergänzung zum völligen Verzicht auf fossile Brennstoffe sehen, sondern als Alternative. Dass dieser Verzicht am Ende der Pariser Konferenz noch aus dem Vertrag gestrichen wurde, sollte als deutliches Warnsignal dienen. Der Vertrag von Paris macht den Weg frei – aber er führt in ein Minenfeld. ↩

(Spektrum.de, 14. Dezember 2015)

Spektrum  
DER WISSENSCHAFT

KOMPAKT

FÜR NUR  
€ 4,99



# WETTER UND KLIMA

Wechselspiel in der Atmosphäre

- > Wie Regen, Wind und Sonne unser Gemüt beeinflussen
  - > Der Jetstream schlägt Wellen
  - > Vorhersage für 2018: Bewölkt mit Rekordhitze

HIER DOWNLOADEN



MEINUNG

# Ein Sieg von Vernunft und Diplomatie

**Stefan Rahmstorf**

Fast alle Staaten der Erde einigten sich in Paris auf ein verbindliches Klimaabkommen, das es in sich hat: Es bedeutet nichts weniger als einen Konsens über das absehbare Ende der fossilen Energie.

ISTOCK / TOMML; PORTRAIT: FRÉDÉRIC BATHIER; MIT FRDL. GEN. VON STEFAN RAHMSTORF

**I**n Paris ist wahr geworden, was viele für unmöglich hielten. Bei der UN-Klimakonferenz im Dezember 2015 vereinbarten die Regierungen der Welt, den globalen Temperaturanstieg seit der Industrialisierung deutlich unter zwei Grad Celsius zu halten und sich sogar um eine Begrenzung auf 1,5 Grad zu bemühen. Damit folgten sie wissenschaftlichen Erkenntnissen: Zuvor wurden mehr als 70 Experten konsultiert, die eine solch striktere Begrenzung empfahlen und viele Vorteile dokumentierten, etwa deutlich reduzierte Risiken für die Ernährungssicherheit, für die Stabilität von Eisschilden und für das Überleben von empfindlichen Ökosystemen wie den Korallenriffen. Das Ziel ist mit sehr raschen und konsequenten Maßnahmen noch erreichbar.

Dafür soll der Ausstoß an klimawirksamen Gasen so bald wie möglich sinken und zu Netto-Nullemissionen nach der Jahrhundertmitte führen. Dieses Ziel ist im Abkommen explizit festgeschrieben. In der Praxis müsste dann nicht nur fast komplett auf fossile Energieträger verzichtet werden – zudem wären auch entsprechende Senken nötig, um schwer vermeidbare

Emissionen aus Landwirtschaft und industriellen Prozessen auszugleichen.

Das Kyoto-Protokoll aus dem Jahr 1997 hatte von den Industriestaaten eine Emissionsreduktion um fünf Prozent gefordert, erreicht wurden sogar zehn Prozent. Die globalen Ausstöße nahmen dennoch zu, weil nur die Industrienationen in der Pflicht waren. Das ist nun überwunden: Fast alle Staaten hatten schon vor der Konferenz konkrete Selbstverpflichtungen vorgelegt. Sie bilden das Herz des Vertrags, bringen in der Summe aber nur etwa die Hälfte dessen, was nötig wäre. Das Abkommen etabliert deshalb Mechanismen, um in fünfjährigen Abständen die Verpflichtungen zu verschärfen und ihre Einhaltung zu kontrollieren.

### **Die Umsetzung fordert nun alle**

Ich bin optimistisch, dass die Transformation rechtzeitig gelingen kann. Erstens wird die in Paris vereinbarte Transparenz und Berichtspflicht einen erheblichen politischen und moralischen Druck aufbauen, der durch die fortschreitende globale Erwärmung und die Opfer und Schäden durch Extremwetter noch wachsen wird.

Zweitens findet diese Entwicklung hin zu nachhaltigen Systemen bereits statt und hat zahlreiche unmittelbare Vorteile, von sauberer Luft bis zu weniger Abhängigkeit von Lieferländern der fossilen Brennstoffe.

Über die Hälfte der weltweiten Energieinvestitionen floss 2015 in die »modernen« Erneuerbaren (ohne Wasserkraft und traditionelle Biomassenutzung zum Kochen und Heizen). Die von diesen erzeugte Energiemenge verdoppelt sich etwa alle fünf Jahre. Sollte die Wachstumsrate anhalten, könnten solche Technologien vor Mitte des Jahrhunderts den kompletten Bedarf der Menschheit decken. Nach Paris werden Investitionen in fossile Versorgung kurzfristig aussehen; Chinas Kohleverbrauch sinkt bereits jetzt.

Das Abkommen hat allerdings auch Schwächen. Vor allem kommt es sehr spät – 50 Jahre nachdem der erste offizielle Expertenbericht in den USA vor der globalen Erwärmung warnte. Das ist nicht zuletzt den von Lobbyisten geschürten Zweifeln an der Wissenschaft zu verdanken, denen viele Verantwortliche allzu gern Gehör schenken. Zudem sind die Emissionen von Luft- und Schifffahrt wieder außen vor

geblieben. Diese Lücke sollte noch im Jahr 2016 geschlossen werden.

Der Vertrag ist aber deutlich besser als weithin erwartet. Allein löst er die Klimakrise nicht, aber das Abkommen schafft den Rahmen und orientiert sich klar am aktuellen Stand der Forschung – ein großer Sieg der Vernunft. Dass sich fast 200 Delegationen auf einen gemeinsamen Wortlaut einigen konnten, ist auch ein Triumph der Diplomatie. Das Resultat gibt mir den Glauben zurück, dass die Menschheit trotz aller Differenzen mit Hilfe der Wissenschaft eine Gefahr erkennen und geeint und rational darauf reagieren kann. Die kommenden Jahrzehnte werden nun zeigen, ob die Dezentertage 2015 in Paris als Wendepunkt in die Geschichte eingehen. ↩

(Spektrum der Wissenschaft, 2/2016)

Alles, was Sie wissen müssen.  
Auf Ihrem Bildschirm.



DAS SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT **DIGITALABO**

Wissenschaftler berichten über die aktuellen  
Erkenntnisse ihrer Fachgebiete.

Jahrespreis (12 × im Jahr) € 60,-; ermäßigt (auf Nachweis) € 48,-

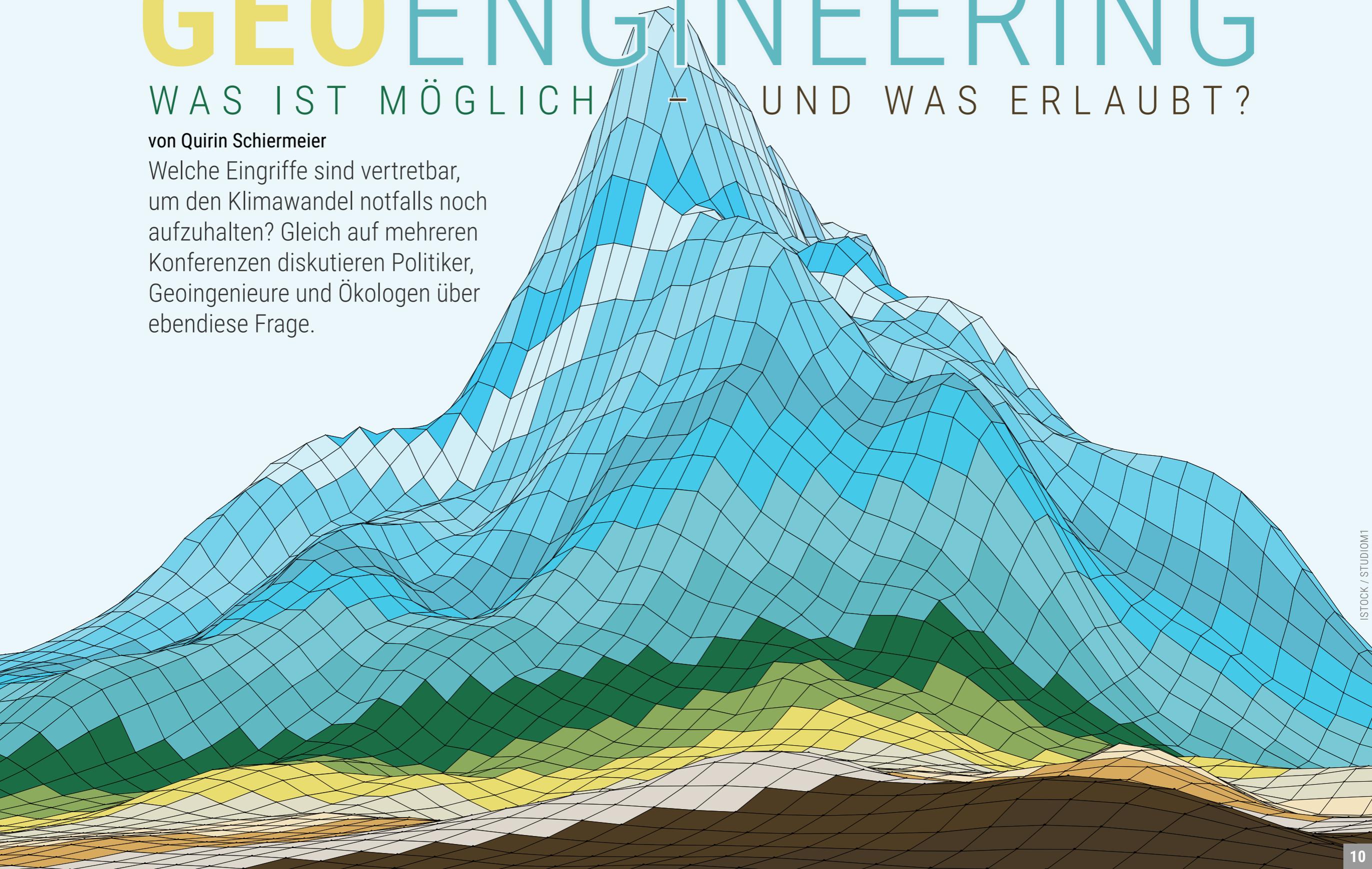
HIER ABONNIEREN

# GEOENGINEERING

WAS IST MÖGLICH — UND WAS ERLAUBT?

von Quirin Schiermeier

Welche Eingriffe sind vertretbar, um den Klimawandel notfalls noch aufzuhalten? Gleich auf mehreren Konferenzen diskutieren Politiker, Geoingenieure und Ökologen über ebendiese Frage.



**A**nfang Dezember 2014 luden die Vereinten Nationen zu einer Konferenz in Lima, **um ein internationales Klimaschutzabkommen vorzubereiten**. Wenig später versammelten sich Vertreter **von Dutzenden wissenschaftlichen Organisationen und Institutionen in Washington D. C.** und diskutierten über Richtlinien für die Forschung auf dem Gebiet des Geoengineering. Mit diesen stark umstrittenen Maßnahmen ließe sich der Planet kühlen – sollten politische Ansätze scheitern.

»Es gibt eine Reihe von Risiken und Unbekannten«, sagt Paul Bertsch, stellvertretender Direktor der Land and Water Flagship der Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO) im australischen Brisbane und ehemaliger Vorsitzender des Council of Scientific Society Presidents, dem Veranstalter der Geoengineering-Konferenz. »Wir müssen also dringend einen abgestimmten Forschungsplan entwickeln und umsetzen, der sich genau damit auseinandersetzt.«

Manche Ideen, wie das Speichern von Kohlenstoffdioxid in Gesteinsschichten oder den Tiefen des Ozeans, werden bereits getestet. Andere wirken eher futuristisch: Durch das Zerstäuben von Meerwasser in der Atmosphäre könnte man beispielsweise die Wolkenbildung fördern und dadurch letztlich mehr Sonnenlicht zurück in den Weltraum reflektieren; mit dem Einbringen von Sulfatpartikeln in die obere Atmosphäre ließe sich der natürliche Kühleffekt von Vulkanasche imitieren; und riesige Spiegel im Orbit wären in der Lage, das Sonnenlicht zurückwerfen, bevor es die Erde erreicht.

Doch weder im ökologischen noch im politischen Umfeld sorgte eines dieser Konzepte für übermäßige Begeisterung. Denn bei der Vorstellung, mit dem Planeten herumzuzperimentieren, wittert so mancher wissenschaftliche Hybris – und sorgt sich um unerwünschte Nebenwirkungen. Klimawissenschaftler befürchten beispielsweise, dass das Einbringen von Sulfat in die Stratosphäre die Niederschläge in einigen Regionen verringern und den Ozonabbau verschlimmern könnte.

Am 2. und 3. Dezember 2014 diskutierten Mitglieder von wissenschaftlichen Organisationen und Instituten, die rund 1,4 Millionen Wissenschaftler, Ingenieure und Dozenten vertreten, welche Forschungsarbeiten angesichts der möglichen sozialen, ökologischen und wirtschaftlichen Folgen von klimaverändernden Maßnahmen annehmbar sind und welche nicht. Eine 2010 im kalifornischen Asilomar abgehaltene Konferenz **brachte diesbezüglich keine klaren Richtlinien hervor**.

Die meisten Wissenschaftler halten es noch für zu früh, über groß angelegte Studien nachzudenken – insbesondere was die Reflexion von Sonnenlicht angeht. Denn bislang seien die Techniken nicht ausreichend unter kontrollierten Bedingungen getestet. Dennoch sollte man das Geoengineering nicht als letztes Mittel gegen die schlimmsten Auswirkungen der Erderwärmung ausschließen, sind sich viele Forscher einig.

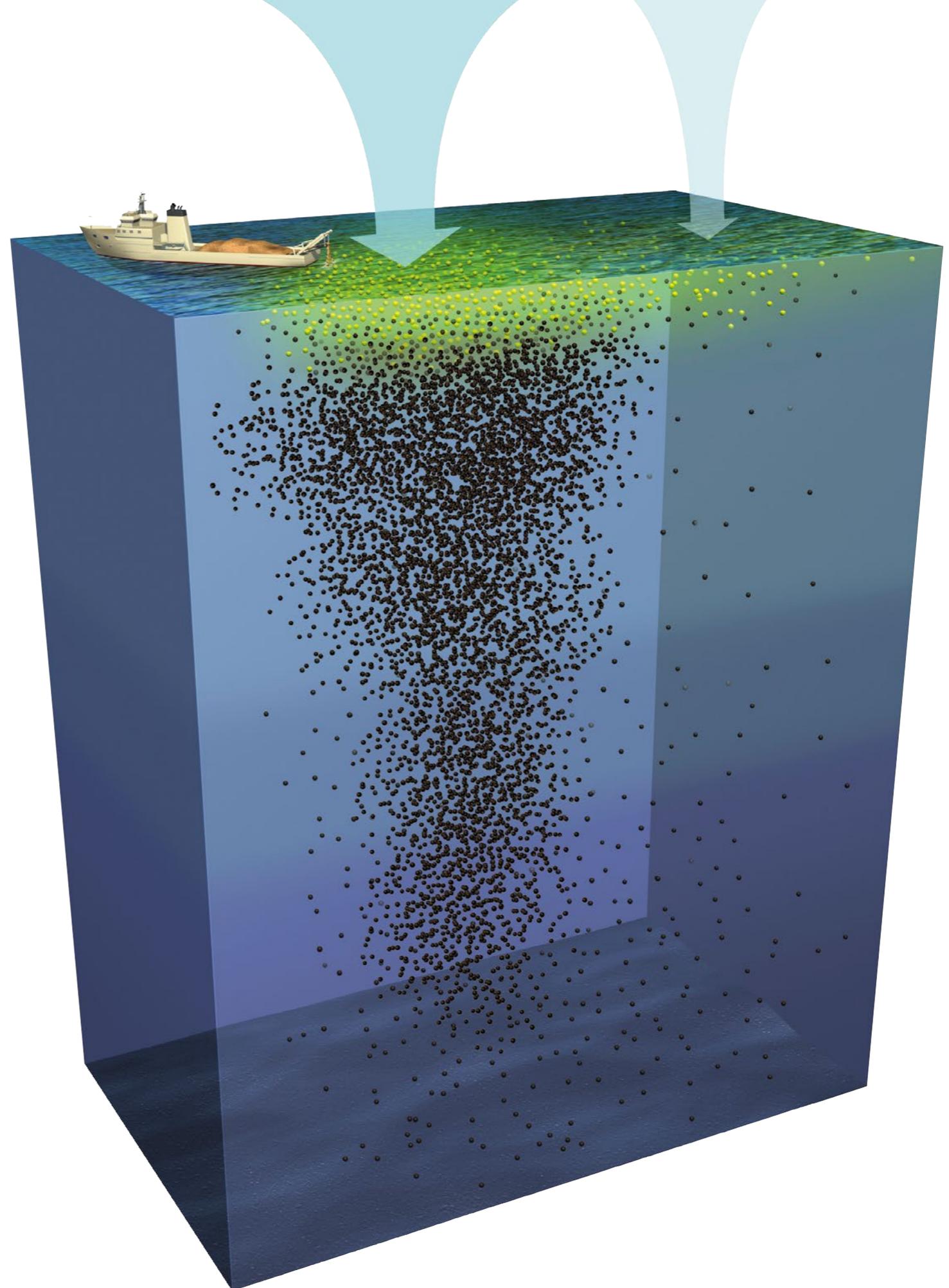
»Es stellt sich die Frage, wann – wenn denn überhaupt – wir mit Freilandversuchen beginnen sollten«, berichtet Matthew

Watson von der University of Bristol in England. Der Vulkanologe leitet ein Projekt, in dem er und seine Kollegen untersuchen, wie der gezielte Eintrag von Licht reflektierenden Partikeln die Atmosphärenchemie beeinflussen könnte. »Ich kann nicht sagen, dass ich ‚Geoengineering‘ besonders mag, aber ich fürchte, wir müssen über kontrollierte Feldversuche nachdenken.«

Die Ozeandüngung, eines der bereits in der Praxis erprobten Verfahren, liefert eine besonders heikle Fallstudie. Die Idee dahinter: Die Aufnahme von Kohlenstoffdioxid durch die Ozeane ließe sich steigern, wenn man Eisen in die Meere gibt und so das Algenwachstum anregt. Sterben die

## GEOENGINEERING: EISENDÜNGUNG AUF HOHER SEE

**Eine der bereits getesteten Geoengineering-Ideen ist die Eisendüngung der Meere: Man strebt dabei an, die Aufnahme von Kohlenstoffdioxid durch Eisen zu steigern. Erwartet wird zunächst ein düngbedingt stärkeres Algenwachstum. Mit abgestorbenen Algen sinkt der von ihnen aufgenommene Kohlenstoff auf den Meeresgrund – bestenfalls für Jahrhunderte, bevor er wieder freigesetzt wird.**



Algen schließlich, sinkt mit ihnen auch der aufgenommene Kohlenstoff auf den Meeresgrund, wo er bestenfalls für Jahrhunderte lagert.

Der Ansatz geriet allerdings unter Beschuss, als Öko-Investoren damit Geld machen wollten: In den Vereinigten Staaten und Australien planten Unternehmen, ausgedehnte Bereiche in den Meeren zu düngen, um so an Emissionszertifikate zu gelangen und diese später im Rahmen des Emissionsrechtehandels zu veräußern. Diese Pläne wurden 2008 durch einen Zusatz im Londoner Abkommen – einem internationalen Vertrag zur Meeresverschmutzung – vereitelt.

Diese Nachbesserung sowie eine wenige Monate zuvor verabschiedete Resolution im Rahmen des Übereinkommens der Vereinten Nationen über die biologische Vielfalt erschwerten weitere Versuche zur Ozeandüngung. Ein internationales Forschungsteam stieß 2009 beispielsweise noch auf enorme Widerstände, als es sich bereits auf dem Weg in den Südlichen Ozean befand, wo es die Algenblüte mit Hilfe von Eisen stimulieren wollte – man befürchtete, gegen internationales Recht zu verstoßen.

## Britische Experimente werfen Fragen auf

**Drei Forschergruppen kommen in ihren Geoengineering-Studien zu ausgesprochen unterschiedlichen Ergebnissen.**

**MATTHEW WATSON VON DER UNIVERSITY OF BRISTOL** stellte die Resultate eines Projekts namens Stratospheric Particle Injection for Climate Engineering (SPICE) vor. Im Rahmen von SPICE untersuchten der Vulkanologe und sein Team, ob in die Atmosphäre eingebrachte Partikel das Sonnenlicht reflektieren und so den Planeten kühlen könnten, um der globalen Erwärmung entgegenzuwirken. Ein geplanter Test dieser Technik wurde 2012 wieder abgesagt, als sich ein Interessenkonflikt wegen einer Patentanmeldung für das Verfahren herausstellte. Laut Watson liefere SPICE aber dennoch nützliche Erkenntnisse – beispielsweise wie ein Großprojekt die Sahelzone in Afrika verändern könnte.

**PIERS FORSTER VON DER UNIVERSITY OF LEEDS** leitete das Projekt Integrated Assessment of Geoengineering Proposals. Mit Hilfe von Computermodellen zeigten der Forscher und seine Kollegen, dass sich verschiedene Techniken zur Manipulation der Sonneneinstrahlung nachteilig auf die Niederschlagsmengen auswirken – und das könnte 25 bis 65 Prozent der Weltbevölkerung betreffen.

**WATSON, FORSTER UND STEVE RAYNER VON DER UNIVERSITY OF OXFORD**, Leiter des dritten Projekts – des sogenannten Climate Geoengineering Governance Project –, stimmen überein, dass ihre Arbeiten viele Fragen aufwerfen.

Ein anderes Experiment, durchgeführt 2012 von einem Amateurforscher vor der Küste von British Columbia, provozierte einen internationalen Proteststurm und sorgte in der kanadischen Regierung für hitzige Diskussionen über die Rechtmäßigkeit dieses Unterfangens.

Wegen solcher ungelösten Probleme auf Regierungsebene stehen wenig finanzielle Mittel für weitere Forschungen bereit. »Wir verstricken uns in politische Fragen«, meint Ken Buesseler von der Woods Hole Oceanographic Institution in Massachusetts. »Es gilt unbedingt gefährliche Experimente zu vermeiden, die nicht wirklich der Wissenschaft dienen. Aber wir haben allen Grund dazu, auf dem Gebiet ernsthafte Wissenschaft in einer offenen und verantwortungsvollen Weise zu betreiben«, so der Meeresforscher.

Die Debatten auf den Konferenzen sollen umfassende Richtlinien für die sichere Durchführung von Feldversuchen schaffen.

Weder die Ozeandüngung noch irgendeine andere einzelne Maßnahme wird das Problem der Erderwärmung lösen, erklärt Anya Waite vom Alfred-Wegener-Institut in Bremerhaven. Auf der Konferenz im De-

zember 2014 repräsentierte sie die Gebiete Ozeanografie und Limnologie. »Aber eingeschränkte Experimente zur Ozeandüngung verraten uns viel darüber, wie biologische Prozesse im Meer das Klima beeinflussen. Im Hinblick auf neue Richtlinien sollten sie Vorrang haben.« ↩

Der Artikel ist im Original »[Climate tinkers thrash out a plan](#)« in »Nature« erschienen.

(Spektrum.de, 10. März 2015)

Spektrum  
DER WISSENSCHAFT

KOMPAKT



# NAVIGATION

Der richtige Weg zum Ziel

Zugvögel

10 rekordverdächtige  
Fernreisende

Wegfindung

Schaden Navigationssysteme  
unserem Orientierungssinn?

Kognition

Routenplanung  
im Rattenhirn

HIER DOWNLOADEN



KOHLLENSTOFFSEQUESTRIERUNG

Kohlendioxid spurlos verschwinden zu lassen,  
ist schwierig. Helfen alte Lavaströme weiter?

# Vulkane versteinern Treibhausgase

von Lars Fischer

**A**uf fossile Brennstoffe zu verzichten, fällt offensichtlich schwer, deswegen wenden sich die Hoffnungen der Klimaschutzgemeinde derzeit wieder Plan B zu: Wenn man Kohlenstoff schon nicht im Boden lassen will, sondern verbrennt, sollte man ihn anschließend wenigstens einfangen, bevor er Schaden anrichtet. Dafür gibt es auch schon einige Verfahren, die man unter der Bezeichnung Carbon Capture and Storage (CCS) zusammenfasst. Dabei pumpt man das Kohlendioxid in tiefe Grundwasserleiter oder alte Gaslagerstätten. Der große Durchbruch blieb der Methode vorerst verwehrt – zuletzt stoppte das Energieunternehmen Vattenfall ein Pilotprojekt in Brandenburg.

Das Problem ist, dass das Kohlendioxid auch dort unten bleiben muss, und Wege an die Oberfläche bietet die rissige Erdkruste genug. Viel einfacher wäre es, wenn Kohlendioxid kein Gas mehr wäre. Und tatsächlich gibt es einige Reaktionen, die das Treibhausgas in harmloses weißes Pulver verwandeln – zum Beispiel mit gelöstem Kalziumhydroxid. Solche Chemikalien sind allerdings teuer und müssen erst ein-

mal in hinreichenden Mengen hergestellt werden.

### **Basalt als Kohlendioxidgrab**

Doch zum Glück gibt es einen Ersatzstoff, der quasi unbegrenzt zur Verfügung steht: Basalt. Kohlendioxid **reagiert mit Basalt zu unlöslichen Kalzium- und Magnesiumkarbonaten** – dauerhafter lässt sich Kohlendioxid nicht verpacken. In der Natur passiert das zum Beispiel, wenn **hydrothermale Lösungen durch den Tiefseeboden zirkulieren** oder abkühlende basaltische Lava mit Grundwasser in Kontakt kommt. Modellrechnungen zeigen, dass ein **Kubikkilometer Basalt theoretisch etwa 260 Millionen Tonnen Kohlendioxid speichern kann**.

In Island, das zu 90 Prozent aus basaltischer Lava besteht, versucht man seit einigen Jahren, dieses Prinzip in die Praxis umzusetzen. In den Jahren 2012 und 2013 pumpt eine Forschergruppe des isländischen Carbfix-Projekts mit etwa 250 Tonnen Kohlendioxid gesättigte Salzlauge in 400 Meter Tiefe. Das Team vermeldete einen Erfolg, der sogar über die Erwartungen hinausging: Proben aus Bohrungen nahe der Injektionsstelle zeigten, dass nach nur einem Jahr mehr als drei Viertel des Koh-

lenstoffs im Gestein gebunden war. Der Versuch endete erst, als sich die Poren des Hydrothermalsystems zuzusetzen begannen.

Carbfix, **eine Zusammenarbeit mehrerer Forschungsinstitute mit Reykjavik Energy**, ist eines von mehreren Projekten, die diese Art Kohlendioxidsequestrierung erproben. In den USA **soll überkritisches Kohlendioxid in tief begrabene Basaltformationen** gepumpt werden, und ähnliche Versuche diskutierten Experten für ein gigantisches Stück uralten Meeresbodens, der im Oman auf dem arabischen Festland gestrandet ist.

### **Die Kostenfalle**

All diese Versuche haben den Vorteil, dass es egal ist, ob die Formationen wirklich gasdicht sind und wie tief sie liegen – wenn das Kohlendioxid erst einmal mit dem Gestein reagiert hat, ist es für sehr, sehr lange Zeit gebunden. Und dass der Ausgangsstoff einmal knapp werden würde, steht auch nicht zu befürchten: Basalt ist eines der häufigsten Gesteine der Erde.

Der potenzielle Kohlendioxidsspeicher bildet die oberen Kilometer des Ozeanbodens und macht etwa ein Zehntel der Kon-

tinente aus – allein die Sibirischen Trapps, der größte Flutbasalt der Welt, enthält genug Basalt, um die weltweiten Kohlendioxidemissionen der nächsten 25 000 Jahre aufzunehmen. So viel wird aber nie anfallen, weil gar nicht genug fossile Brennstoffe zum Verbrennen zur Verfügung stehen.

Der Haken an der Sache ist ein anderer: In der Atmosphäre macht das Treibhausgas nur Bruchteile eines Prozents aus, und auch in Verbrennungsgasen stellt Stickstoff den Löwenanteil. Damit man Kohlendioxid in den Boden pumpen kann, muss man es erst einmal auffangen, sammeln und konzentrieren. Eine Tonne Kohlendioxid abzutrennen und in den Boden zu pumpen, kostet Reykjavik Energy derzeit etwa 80 bis 130 Euro. Auf die Emissionen deutscher Kraftwerke hochgerechnet, sind das knapp zehn Prozent des Gesamtumsatzes der deutschen Energiewirtschaft. Klimaschutz ist schon an kleineren Summen gescheitert. ↩

(Spektrum.de, 15. April 2015)



**Spektrum**  
DER WISSENSCHAFT

# KOMPAKT

# ERDBEBEN UND VULKANE

## Unsere unruhige Erde

- Das Zeitalter der Megabebeben
- Notfallplanung am Vesuv
- Der Einfluss des Klimawandels

FÜR NUR  
€ 4,99

HIER DOWNLOADEN

FOTOLIA / PABLO HIDALGO



OZEANDÜNGUNG

# WIE GUT WIRKT DIE **EISENDÜNGUNG** DER MEERE?

von Daniel Lingenhöhl

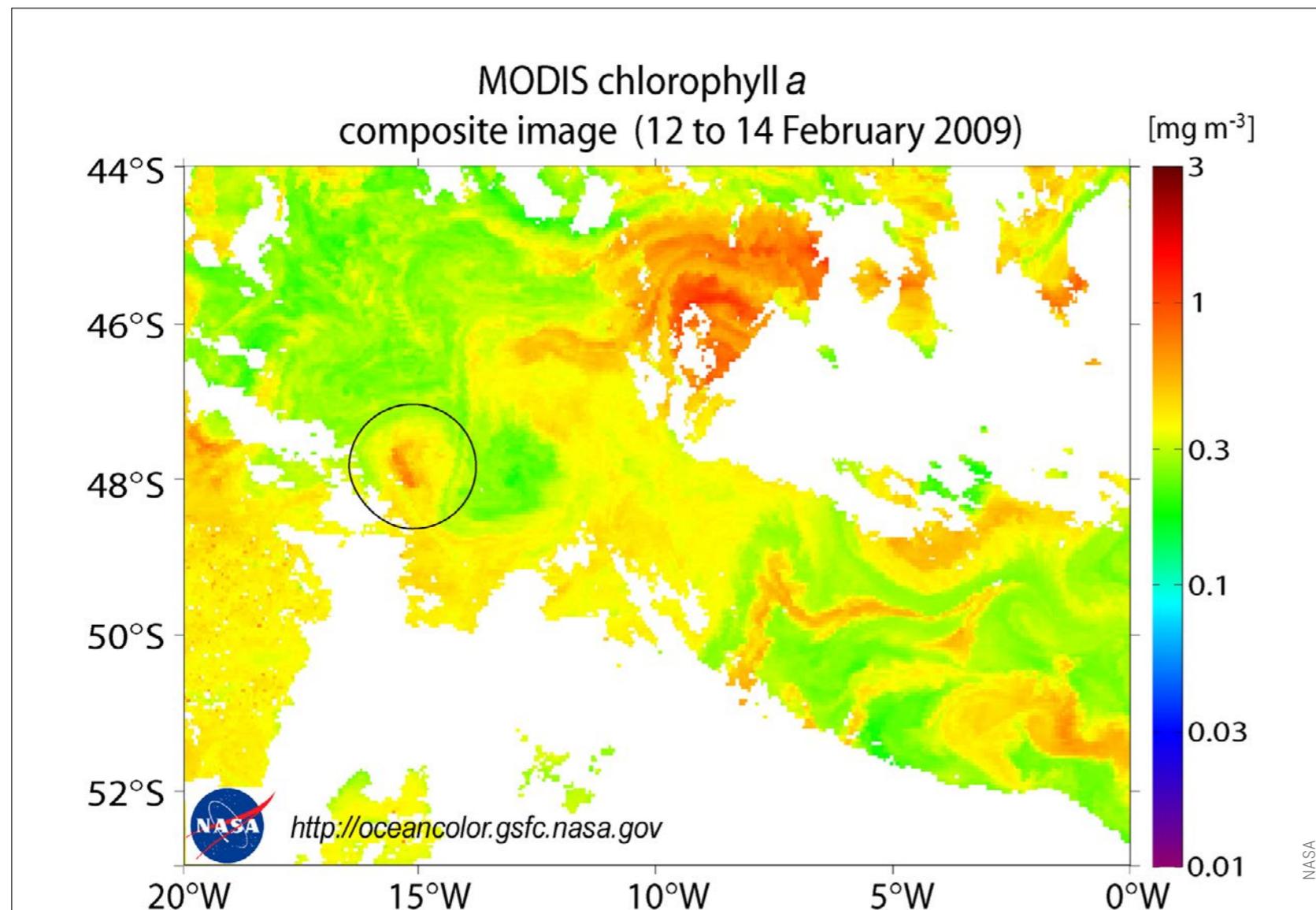
Die Weltmeere speichern große Mengen Kohlendioxid: Das wollen Geoingenieure gezielt fördern. Doch wie gut hilft die Methode gegen den Klimawandel?

Um die Erderwärmung einzudämmen, schlagen nicht wenige Interessierte gezielte Eingriffe vor, um das Kohlendioxid durch verstärkte natürliche Prozesse der Atmosphäre zu entziehen. Eine der beliebtesten Methoden ist die Eisendüngung bestimmter Meeresregionen, um dort das Algenwachstum anzuregen: Das Nährelement ist vie-

lerorts Mangelware, fügt man es dem Wasser hinzu, bilden sich dort regelrechte Planktonblüten. Stirbt dann das Phytoplankton ab und sinkt in die Tiefsee, verschwindet mit ihm der aufgenommene Kohlenstoff für längere Zeit – so die Theorie, die in Einzelfällen schon (unreguliert) angewendet wurde. In der Praxis zeigten sich bislang jedoch nur gemischte Ergebnisse. Der Prozess funktioniert unter be-

stimmten Bedingungen einigermaßen, wie das EIFEX-Experiment des Helmholtzzentrums für Polar- und Meeresforschung in Bremerhaven vor einigen Jahren zeigte. Er kann aber auch – unter anderen geochemischen und biologischen Gegebenheiten – eine nur geringe Kohlenstoffverlagerung nach sich ziehen, wie das ebenfalls vom Helmholtzzentrum durchgeführte LOHAFEX-Experiment belegte.

Ein weiterer Versuch des Helmholtzforschers Ian Salter und seiner Kollegen mehrte erneut die Zweifel an der Effizienz der Maßnahme: Sie untersuchten ein kleines Meeresgebiet im Südpolarmeer in der Nähe der südafrikanischen Crozet-Inseln, wo Eisen im Gegensatz zu anderen Regionen des Ozeans reichlich ins Wasser geschwemmt wird – das Vulkangestein der Eilande sorgt über die Erosion konstant für Nachschub. Das regt aber nicht nur das



## ALGENBLÜTE

**Satellitenaufnahme der Chlorophyllkonzentrationen an der Meeresoberfläche mit der Lohafex-Blüte (eingekreist). Man beachte die entschieden größere natürliche Blüte oben rechts und die höheren Werte im Südosten.**



## **WELLEN IM SÜDATLANTIK**

**Zwischen dem Ozean und der Atmosphäre herrscht ein reger Austausch des Treibhausgases Kohlendioxid. Das Südpolarmeer spielt hierbei eine wichtige Rolle.**

Phytoplankton an zu wachsen, sondern fördert auch seine Fressfeinde: Dank des Nahrungsreichtums vermehren sie sich stark. Dabei handelt es sich vor allem um Foraminiferen und Flügelschnecken. Diese Arten bauen zwar Kohlenstoff in Kalkschalen ein, setzen mit ihrem vergleichsweise hochoxydierenden Stoffwechsel aber insgesamt noch mehr Kohlendioxid frei, was in den bisherigen Kalkulationen nicht berücksichtigt wurde.

Die natürliche Eisendüngung bewirkt, dass am Ende mehr Kalkschalen in die Tiefsee gelangen als abgestorbenes Phytoplankton, unter dem Strich jedoch weniger Kohlendioxid vermieden wird als erhofft: »Unsere Untersuchungen lassen vermuten, dass der durch das Eisen angeregte Export der Kalkschalen dazu führt, dass in einer natürlich gedüngten Meeresregion 10 bis 30 Prozent weniger Kohlendioxid gespeichert wird, als wir bisher angenommen hatten«, sagt Salter. Dementsprechend geringer wäre die erhoffte Senkenwirkung im Fall eines geotechnischen Eingriffs. »Wir wissen allerdings nicht, ob dies auch der Fall wäre, wenn ein Gebiet künstlich mit Eisen gedüngt wird«, erklärt der Biogeochemiker.

Außerdem verändert die Eisenzufuhr womöglich die Artenzusammensetzung: In den Sedimentfallen der Forscher tummelten sich vermehrt Arten mit größeren Kalkschalen verglichen mit an Eisen verarmten Regionen in der Nähe. Größere Gehäuse bedeuten jedoch wieder eine größere Kohlendioxidfreisetzung wegen des angekurbelten Gesamtstoffwechsels – auch wenn die Organismen im Gegenzug ihr Kalkskelett und dabei etwas mehr Kohlenstoff im Kalk fixieren. Eine gezielte Düngung könnte somit ebenso die biologische Zusammensetzung des Ökosystems beeinflussen – mit momentan nicht absehbaren Folgen. »Unsere Ergebnisse gelten aber nur für eine bestimmte Region im Südpolarmeer. Die Effekte der Kalk bildenden Organismen können sehr unterschiedlich sein, je nachdem, um welche Art es sich handelt und wo im Ozean sie leben«, so Salter weiter. Als Nächstes will der Forscher daher mit seinem Team andere, natürlich gedüngte Meeresgebiete untersuchen, wo beispielsweise die Meereissschmelze den Kohlenstoffkreislauf zunehmend beeinflusst. ↩

(Spektrum.de, 10. November 2014)

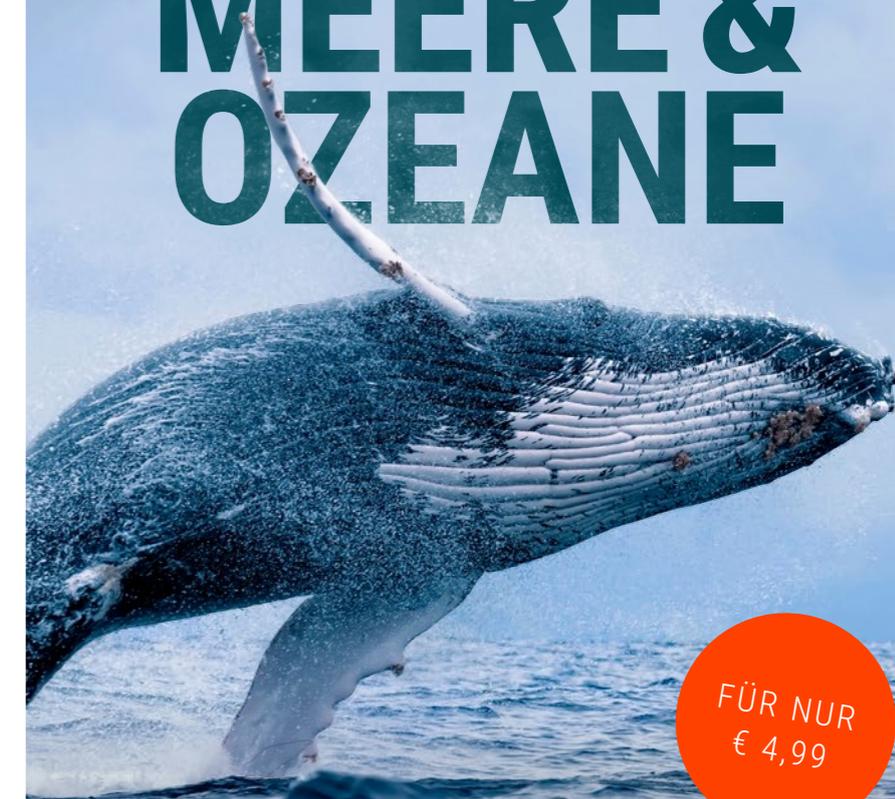
Nature Geo 10.1038/ngeo2285, 2014

Spektrum  
DER WISSENSCHAFT

KOMPAKT

Quelle des Lebens

# MEERE & OZEANE



FÜR NUR  
€ 4,99

- > Der lange Weg des Plastikmülls im Meer
- > Stammt das Meersalz aus Kometen?
- > Haiwanderungen auf der Spur

HIER DOWNLOADEN



SCHWEFELSCHIRM

# Der **Irrweg** der Klimamanipulation

von Daniel Lingenhöhl

Ein künstlicher Sonnenschirm aus Schwefelteilchen ist machbar und könnte die Erde kühlen. Doch der Eingriff ist höchst riskant und darf keine Option für die Zukunft sein, meint Daniel Lingenhöhl.

Ungerührt pustet die Weltgemeinschaft weiter Kohlendioxid in den Himmel. Erstmals seit Beginn der Aufzeichnungen 1958 überschritt im Jahr 2013 die Konzentration des Treibhausgases den Wert von 400 ppm (parts per million) am hawaiianischen Vulkan Mauna Loa. Und allen Bemühungen der Staaten zum Trotz stehen die Zeichen auf weitere Zunahme: Zwar stiegen die Emissionen im Jahr 2012 nicht so stark wie befürchtet, was für eine Entkoppelung von Wirtschaftswachstum und CO<sub>2</sub>-Ausstoß spricht. Doch insgesamt nimmt der Kohlendioxidgehalt in der Luft selbst in Krisenzeiten weiter zu. Kein so genanntes Klimaschutzabkommen konnte dies bislang auch nur ansatzweise verhindern.

Das hat natürlich Folgen für den Planeten, auch wenn seit einigen Jahren die weltweite Mitteltemperatur auf relativ hohem Niveau verharrt und aus noch unbekanntem Gründen nicht parallel zur Kohlendioxidkonzentration zulegt: Die Arktis beispielsweise erwärmt sich ungerührt weiter, und die Meere versauern stetig. Die Erwärmungspause kann aber natürlich jederzeit enden, und der Klimawandel sich deshalb



wieder beschleunigen. Und so verschwinden auch Ideen zur Eindämmung der Erderwärmung nicht – allen voran der künstliche Sonnenschirm am Himmel, mit dem man technisch große Mengen an Schwefel-

## AUSBRUCH DES PINATUBO 1991

teilchen ausbringt: Wie ein Grauschleier sollen sie sich in der Atmosphäre um die Erde legen und so die Sonneneinstrahlung teilweise abblocken – die Temperaturen würden eingehegt, so die Überlegungen.

Als Vorbild für dieses Verfahren dienen große Vulkanausbrüche wie der des [philippinischen Pinatubo 1991](#), dessen Asche- und Schwefelfracht im Jahr darauf die weltweite Mitteltemperatur um 0,5 Grad Celsius gesenkt hatte. Längst gibt es Studien, die zeigen, dass ein derartiges Verfahren technisch und finanziell machbar wäre. Und immerhin geht der Vorschlag auch auf [Paul Crutzen](#), einen der Entdecker des Ozonlochs und Nobelpreisträger der Chemie, zurück.

Doch diese Idee ist ein Irrweg – auch das zeigt die Forschung. Kelly McCusker von der University of Washington und ihr Team beispielsweise warnen davor, den Schwefelschirm aufzuspannen, wenn man nicht gleichzeitig dennoch den CO<sub>2</sub>-Ausstoß reduziert. Andernfalls müsste man diese Art des [Geoengineerings](#) dauerhaft betreiben, so die Forscherinnen in ihrer Veröffentlichung: Sobald man den Schwefelschirm nicht mehr künstlich aufrechterhält und die Sonne wieder unge-

hindert strahlen kann, machen die Temperaturen in kurzer Zeit einen Satz nach vorne. So ließe sich die Erwärmung mit Hilfe des Sonnenschirms auf ein Grad Celsius begrenzen, nach seinem Zusammenbruch schossen die Werte aber innerhalb weniger Jahrzehnte um vier Grad Celsius in die Höhe. Dem Planeten würde also rasch eingeheizt, wobei die Folgen wohl am drastischsten in tropischen Regionen wie Teilen Afrikas und Südasien ausfallen – mithin Regionen, die bereits heute unter Wetterkapriolen und damit verbundenen Ernteaufschlägen leiden. Ebenfalls nicht kalkulierbar sind die Folgen für den Wasserkreislauf und damit für die Niederschlagsverteilung: Dürren oder Überflutungen blieben weiterhin Risikofaktoren für die Bevölkerung, und ihre Entstehung wird noch unkalkulierbarer als gegenwärtig, weil man kaum voraussehen kann, wie das manipulierte Klima regional durchschlägt. Und letztlich spielen sogar ethische und ästhetische Fragen eine Rolle – etwa dass der Himmel nicht mehr blau wäre.

Momentan herrscht faktisch ein Moratorium bezüglich des Geoengineerings: 2010 hatten sich [Vertragsstaaten der Bio-](#)

[diversitätskonferenz](#) darauf verständigt, Geoengineering nicht einzusetzen, »bis eine gesicherte wissenschaftliche Basis besteht, die derartige Aktivitäten rechtfertigt und die damit verbundenen Risiken ausreichend berücksichtigt«. Und auch der Weltklimarat [IPCC](#) empfiehlt gegenwärtig diese Methoden nicht, um den Klimawandel einzudämmen. Doch vom Tisch sind diese Techniken damit noch lange nicht – auch die Forschung daran darf vorerst weiterlaufen (was prinzipiell nicht verkehrt ist, um überhaupt die Risiken zu erkennen). Spätestens wenn die Erwärmungspause endet und die Temperaturkurve erneut nach oben zeigt, kommen die Diskussionen dazu wieder verstärkt auf.

Von den vielen Methoden, die Erderwärmung technisch in den Griff bekommen zu wollen, erscheint die des Schwefelschirms jedoch als eine der heikelsten. Ihr Einsatz birgt die größten Risiken. Und deshalb sollten die Vereinten Nationen sie bereits jetzt international bannen – bevor tatsächlich ein Staat voreilig aktiv wird. ↵

(Spektrum.de, 18. Februar 2014)

Environ. Res. Lett. 9, 024005, 2014



KLIMAWANDEL

# In der Hitze der Stadt

von Hannah Hoag

Weltweit haben zahlreiche Ballungsgebiete mit steigenden Temperaturen zu kämpfen. Und Maßnahmen gegen die Hitze scheinen nicht immer wie erhofft zu greifen.

**A**uf Satellitenfotos stechen die Gewächshäuser entlang der Südküste Spaniens deutlich hervor, so hell strahlen sie. Seit den 1970er Jahren erweitern die Bauern in der Provinz Almería ihre Infrastruktur aus Treibhäusern stetig und bauen darin unter anderem Tomaten, Paprika und Wassermelonen für den Export an. Um die Pflanzen im Sommer vor Überhitzung zu schützen, malen sie die Dächer mit weißem Kalk an – so wird das Sonnenlicht besser reflektiert. Durch diese Maßnahme werden allerdings nicht nur die Nutzpflanzen gekühlt. **Im Lauf der vergangenen 30 Jahren erwärmte sich die umgebende Region um ein Grad Celsius, während die durchschnittliche Lufttemperatur nahe den Gewächshäusern um 0,7 Grad Celsius absank.**

Diesen Effekt würden Städte rund um den Erdball gerne nachahmen. Denn wenn sich das Klima in den kommenden Jahrzehnten wandelt, dürfte die globale Erwärmung die Metropolregionen besonders

hart treffen: Gebäude und asphaltierte Flächen absorbieren das Sonnenlicht, heizen sich auf und erhöhen so die örtlichen Temperaturen – **ein als »städtische Wärmeinsel« bekanntes Phänomen.** Deshalb steigt die Wahrscheinlichkeit für extreme Hitzeperioden in Städten, die durchaus lebensbedrohlich sein können. »Hitzebedingte Sterbefälle überstiegen in den Vereinigten Staaten – in den letzten 30 Jahren – alle anderen Todesursachen durch extreme Wetterereignisse«, berichtet Kim Knowlton, Gesundheitswissenschaftler an der Columbia University in New York. »Dieses Problem verschwindet nicht mehr.«

Einige Städte bemühen sich bereits, diese heiße Zukunft abzuwenden: Sie pflanzen beispielsweise Bäume und legen Parks an. Das Hauptaugenmerk liegt jedoch auf den Dächern – riesigen ungenutzten Flächen, die das Sonnenlicht schlucken und sich aufheizen. Seit 2009 ist Toronto die erste Stadt in Nordamerika, die Richtlinien für Gründächer erließ. Demnach müssen neue Gebäude ab einer bestimmten Größe

begrünt sein, damit die Pflanzen das Regenwasser speichern und die Temperaturen in der Stadt absenken können, so die Hoffnung. In Kalifornien verfügte Los Angeles 2014, dass neue und renovierte Wohnhäuser so genannte »cool roofs«, also »kühle Dächer«, aus hellen Materialien haben sollen, die das Sonnenlicht reflektieren. Und in Frankreich müssen die Dächer von Neubauten in Gewerbegebieten gemäß einem im März 2015 verabschiedeten Gesetz teilweise mit Pflanzen oder Solarmodulen bedeckt sein.

**Doch vor lauter Tatendrang lassen die Städte oft die Wissenschaft hinter sich.** Denn obwohl stark reflektierende oder begrünte Dächer die Temperaturen am oberen Ende der Gebäude absenken können, bringen sie nicht unbedingt auch Vorteile auf Straßenniveau. Möglicherweise führen sie sogar zu unerwünschten Effekten, vermindern mancherorts etwa die Regenmenge. »Man nahm einfach an, die Forschergemeinde sei zu einem abschließenden Ergebnis gelangt und es gebe eine

## DACHBEGRÜNUNG IN HONGKONG

Pflanzen auf Hausdächern sollen helfen, den Klimawandel in den Städten zu dämpfen. Die Ergebnisse sprechen aber keine klare Sprache.



Patentlösung«, erläutert Matei Georgescu von der Arizona State University in Tempe. »Aber das ist nicht der Fall«, so der Nachhaltigkeitswissenschaftler.

Darüber hinaus ist unklar, ob sich die gegenwärtigen Programme überhaupt messbar auf die Temperatur – und die Gesundheit der Bürger – auswirken werden und ob die Städte ihre Bemühungen genügend ausweiten, um tatsächlich Ergebnisse zu erzielen. »Wenn man begrünte Dächer nur auf dem Rathaus und auf Schulen realisiert, bringt das so gut wie gar nichts«, weiß Städtforscher Brian Stein Jr. vom Georgia Institute of Technology in Atlanta.

### Heiße Zeiten in der Stadt

Im August 2003 erfasste Westeuropa zehn Tage lang eine Hitzewelle, die alle Rekorde der vergangenen fünf Jahrhunderte brach. Die Tagestemperaturen schossen in Paris bis auf 40 Grad Celsius, und auch die Nächte blieben unerträglich heiß. Bis Ende August war die Zahl der Todesopfer durch Dehydrierung, Hyperthermie, Hitzschlag und Atemprobleme in ganz Europa auf mehr als 70 000 gestiegen, wobei insbesondere die Stadtgebiete um Paris und Moskau viele Opfer zu beklagen hatten.

Dies ist nur ein Vorgeschmack auf die bevorstehenden Verhältnisse. Laut regionalen Klimamodellen könnten bis 2050 einwöchige Hitzeperioden – ähnlich wie im August 2003 oder im Sommer 2015 – **einmal pro Jahrzehnt in Osteuropa und alle 15 Jahre in Westeuropa auftreten**. Auf der gesamten Welt dürfte die Anzahl, Dauer und Häufigkeit von Hitzewellen zunehmen, so die Prognose. »Dies ist eines der wenigen Extremereignisse, bei dem alle Modelle miteinander übereinstimmen«, sagt Klimaforscher Dan Li von der Princeton University in New Jersey. Sobald die Temperaturen steigen, leiden Städte auf Grund ihrer Bauweise überproportional darunter: Dunkle Dächer, Straßen und andere Konstruktionen absorbieren die eintreffende kurzwellige Sonnenstrahlung und geben die aufgenommene Energie in Form langwelligerer Wärmestrahlung wieder ab, wodurch sich die umgebende Luft aufheizt. Klimaanlage verstärken das Problem, indem sie zwar das Innere von Gebäuden und Fahrzeugen kühlen, doch dabei warme Luft nach außen abführen und die Temperaturen in der Stadt so weiter erhöhen.

Zudem breiten sich die Wärmeinseln weiter aus: Bis 2050 wird sich die Stadtflä-

che in den USA voraussichtlich um ein Drittel ausdehnen. Gleichzeitig wächst die Weltbevölkerung bis dahin laut Prognosen auf 9,6 Milliarden Menschen, wobei zwei Drittel in städtischen Gebieten leben werden – heute ist es nur gut die Hälfte. Durch diese Entwicklungen speichern die Städte künftig noch mehr Wärmeenergie, und immer mehr Menschen werden von extremer Hitze betroffen sein. Trotz dieser Gefahr haben nur wenige Metropolen derzeit konkrete Pläne, wie sie das Problem der Wärmeinseln angehen wollen. In den Vereinigten Staaten, so Stone, »ignorieren die meisten Ballungsgebiete das Klimathema«.

Los Angeles gehört nicht dazu. Seit 1878 stieg die Jahresdurchschnittstemperatur in der Stadt um mehr als zwei Grad Celsius. Bis zur Mitte des Jahrhunderts könnte der Innenstadtbereich alljährlich mit 22 Tagen extremer Hitze (mit Temperaturen über 35 Grad Celsius) konfrontiert sein, **das entspricht fast dem Vierfachen des Langzeitdurchschnitts**. Um der Erwärmung entgegenzuwirken, will die Stadt bis 2017 10 000 dunkel gefärbte Dächer in »cool roofs« umwandeln und zudem vermehrt auf Straßenbepflanzungen und reflektierende Bodenbeläge setzen. Bis 2035 hofft man mit

## SANTORIN

Stadtplaner sollten sich öfter an traditionellen Bauweisen südlicher Länder orientieren: Die Häuser Santorins beispielsweise sind mit Kalk weiß getüncht, um die Hitze draußen zu lassen.



diesen Ansätzen den Effekt der städtischen Wärmeinseln um 1,65 Grad Celsius abzumildern.

Auch Chicago nimmt auf diesem Gebiet eine führende Rolle ein: Während einer fünftägigen Hitzewelle im Jahr 1995 kamen dort 700 Menschen zusätzlich ums Leben – diese Tragödie soll sich nicht noch einmal wiederholen. Und so bemüht man sich seither um begrünte oder stark reflektierende Dächer sowie Straßenbepflanzungen – und gestaltete asphaltierte Spielplätze in Rasenflächen um. Nicht zuletzt dank finanzieller Anreize verfügen mittlerweile mehr als 509 Gebäude in der Stadt über begrünte Dächer, mit einer Gesamtfläche von mehr als 516 000 Quadratmetern.

Toronto holt derweil schnell auf. In der kanadischen Stadt müssen Neubauten mit mehr als sechs Stockwerken und mehr als 2000 Quadratmetern Dachfläche 20 bis 60 Prozent davon mit Pflanzen bedecken. Seit 2010 entstanden durch diese Vorgabe 260 begrünte Dächer auf insgesamt 196 000 Quadratmetern. Manche der klimafreundlichen Dachtypen sind preislich vergleichbar mit herkömmlichen Dächern. Das Anlegen eines Gründachs ist dagegen teurer, und auch die Instandhaltungskosten

fallen höher aus. Dafür bieten begrünte Dächer andere Vorteile, indem sie etwa den Abfluss von Regenwasser verlangsamen, Lebensraum für bestäubende Insekten bieten und die Städte einfach schöner machen.

### **Das richtige Dachgrün muss es sein**

Auf dem Dach der Architekturfakultät der University of Toronto sausen Hummeln von einer gelben Blüte zur nächsten. Das Gebäude liegt mitten im Stadtzentrum und beherbergt einen Flickenteppich aus 33 rechteckigen Hochbeeten, in denen neben heimischen Gräsern und Blumen auch exotische Gewächse namens Fetthennen mit wachsartigen, Wasser speichernden Blättern gedeihen. In jedem Beet findet sich eine andere Kombination aus Pflanzen, Erde und Bewässerungstechnik, überwacht von 270 Sensoren, die Luft- und Bodentemperatur, Bodenfeuchte und Regenwasserabfluss erfassen. Der Dachgarten ist Teil des Green Roof Innovation Technology Laboratory (GRIT Lab) – der einzigen Einrichtung dieser Art in Kanada –, das den Nutzen von Gründächern und anderen Maßnahmen im Kampf gegen den Klimawandel unter die Lupe nimmt.

Begrünte Dächer reflektieren mehr Sonnenlicht als herkömmliche Teer- oder Kiesdächer, doch die Feuchtigkeit in Pflanzen und Boden sorgt für einen Kühleffekt: Wasser aus Blättern und Erde verdunstet und gibt die Wärme auf diese Weise an die Atmosphäre ab, wodurch die Temperatur der umgebenden Luft sinkt. Nach demselben Prinzip kühlen auch Sportler ihren Körper ab, wenn ihr Schweiß verdunstet. An einem heißen Sommertag kann ein Gründach durch diesen Effekt um bis zu 40 Grad Celsius kälter sein als ein schwarzes. Begrünte Dächer wirken zudem wie eine Isolierschicht für das Haus und senken so die mit der Klimatisierung verbundenen Energiekosten.

Das kühlste Testbeet auf dem Gründach des GRIT Lab wird bewässert, enthält organische Erde und ist mit Fetthennen bepflanzt, die eine dicke Matte bilden und bereits über den Beetrand hinauswuchern. Das Nachbarbeet ist dagegen mit einem porösen Gesteinsmaterial ausgekleidet, das auf vielen Gründächern zum Einsatz kommt. Die darin wachsenden Wiesengräser bekommen kein zusätzliches Wasser und gedeihen sehr ungleichmäßig. Über dem Fetthennenbeet liegt die Temperatur

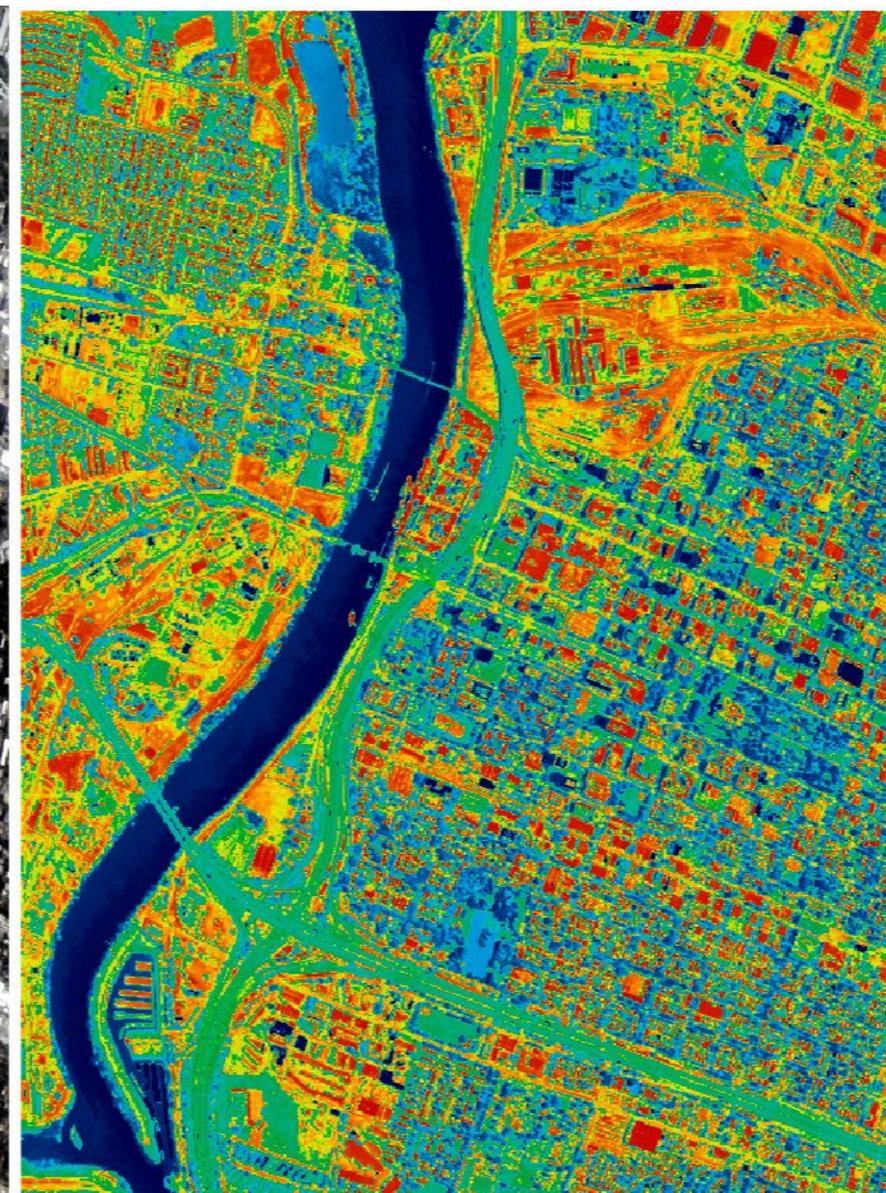
vier Grad unter der Lufttemperatur, berichtet Liat Margolis, während das spärlich bepflanzte Grasbeet bis zu 14 Grad Celsius wärmer sein kann. »Man könnte also genauso gut darauf verzichten auf seinem Dach«, so die Direktorin des GRIT Lab. Experimente wie diese zeigen, fügt Margolis hinzu, wie schwierig sich die richtige Kom-

bination aus Substrat, Pflanzenbewuchs und Bewässerung finden und so die Temperatur auf einem Dach beeinflussen lässt.

Und selbst mit den besten Gründächern bleibt unklar, inwieweit sich dieser Ansatz auf die Temperatur einer ganzen Stadt auswirkt. Nur wenige Simulationen haben den Einfluss begrünter Dächer in diesem Maß-

stab abgeschätzt. Ein zehn Jahre altes Gutachten für Toronto legt beispielsweise nahe, dass sich die Außenlufttemperatur um 0,5 bis 2 Grad Celsius absenken ließe, wenn man die insgesamt 50 Quadratkilometer an verfügbaren Dachflächen begrünen würde. Seitdem die Verordnung in Kraft trat, wurden allerdings weniger als 0,5 Prozent der vorhandenen Areale in Gründächer umgewandelt. In der Baltimore-Washington-Metropolregion könnte die maximale Tagestemperatur während einer dreitägigen Hitzewelle laut einer 2014 veröffentlichten Studie um 0,5 Grad Celsius gesenkt werden, wenn **90 Prozent der Dächer bepflanz**t würden.

Sobald die Sonne allerdings untergeht, verdunstet weniger Wasser, und dementsprechend kühlen die Gründächer längst



#### WÄRMEBILD VON SACRAMENTO

**Städte sind Wärmeinseln in der Landschaft, weil sich die bebaute Fläche stärker aufheizt als die Umgebung. Besonders dunkle Flächen wie Parkplätze oder Hausdächer. Zu erkennen sind die besonders warmen Areale im Infrarotbild durch gelbe und rote Farben, während kühlere Bereiche blau und grün erscheinen.**

NASA/MARSHALL SPACE FLIGHT CENTER

nicht mehr so gut – bei Hitzewellen wird die Nacht so zu einer unerträglichen Zeit. Zudem setzen Dachbepflanzungen die tagsüber gespeicherte Wärme nach Sonnenuntergang wieder frei. »Damit lassen sich zwar am Tag die Temperaturen absenken, aber in der Nacht könnten sie sich sogar erhöhen«, schildert David Sailor, Stadtklimaforscher an der Portland State University in Oregon.

Ob begrünte Dächer, die sich ja in luftiger Höhe befinden, den Menschen unten auf der Straße Abkühlung verschaffen, ist ebenfalls unklar. Wissenschaftler simulierten einen Tag während der Hitzewelle in Europa 2003 und kamen zu einem ernüchternden Ergebnis: Eine Bepflanzung von 25 Prozent der Dachfläche entlang einer Straße im Zentrum von Arnheim in den Niederlanden hätte demnach keinen Einfluss auf die Temperaturen auf Straßenniveau – denn der Wind blies die kühlere Luft fort, bevor diese den Boden erreichen konnte. Auch die Evaluation von bepflanzten Dächern in Chicago stellt deren Vorteile in Frage. Forscher untersuchten anhand von Satellitenbildern aus den Jahren 1995 und 2009 die Oberflächentemperaturen an solchen Plätzen in der Stadt, wo man dunkle

Dächer und Flächen entweder begrünt oder durch helle Beläge ersetzt hatte: **Im Gegensatz zu stark reflektierenden Dächern veränderten Gründächer die Temperaturen nicht wesentlich, so das Resultat.** »Cool roofs« erhöhten das Reflexionsvermögen oder die Albedo der Stadt um 1,6 Prozent – das entspricht der Kühlleistung von 65 000 fenstergroßen Klimaanlage, die den gesamten Sommer über mit voller Auslastung laufen. Das Pflanzen von Bäumen und Umwandeln von asphaltierten Flächen in Rasenflächen erwies sich ebenfalls als wirksamer verglichen mit Gründächern.

### **Kehrseite der Medaille**

In Almería ist der Effekt sogar noch größer. Nachdem die Landwirte die Gewächshausoberflächen im Sommer mit Löschkalk weißten, werfen diese 35 Prozent des einfallenden Sonnenlichts zurück. Die nahe gelegenen Weideflächen reflektieren dagegen nur 15 Prozent, ebenso wie die meisten Städte. Hellere Straßen und Dächer könnten Städte tatsächlich erheblich abkühlen, wie Simulationen zeigen. Verdoppelte man etwa das Reflexionsvermögen der Dächer von Los Angeles, das im

Schnitt bei 17 Prozent liegt, ließen sich die Temperaturen in einigen Gegenden um 0,5 Grad Celsius und in anderen sogar um bis zu zwei Grad Celsius reduzieren, berichtet Haider Taha als Vorstandsvorsitzender des Meteorologieunternehmens Altostratus im kalifornischen Martinez. »Ein Grad Celsius ist nicht zu viel verlangt – und laut den Modellen ist das durchaus machbar«, so der Wissenschaftler.

Je nach Lage haben stark reflektierende Dächer aber möglicherweise auch einige nachteilige Folgen. Erhöht man die Albedo zu stark, schwächt das möglicherweise den Meereswind ab, vermindert die Luftqualität oder wärmt in Windrichtung liegende Regionen auf, erläutert Taha. »Jede Stadt hat einen bestimmten Schwellenwert, und wenn man den überschreitet, kippt die Situation.« »Cool roofs« könnten zudem die Regenmenge verringern. Denn in vielen Regionen erwärmt sich tagsüber der Boden, wodurch feuchte Luft aufsteigt und so die Wolkenbildung antreibt und schließlich für Niederschläge sorgt. »Wenn das ausbleibt, dann haben wir keine Niederschläge mehr«, kommentiert Georgescu. Würde man die »kühlen Dächer« in Stadtgebieten von Florida bis in den Nordosten

der USA großflächig umsetzen, fand der Wissenschaftler in einer Studie heraus, könnte der mittlere Tagesniederschlag im Sommer bis 2100 um zwei bis vier Millimeter sinken.

Trotz dieser Unsicherheiten, so die Ansicht vieler Forscher, würden Metropolen die verschiedenen Kühlkonzepte nicht rasch genug verfolgen – in Anbetracht des schnell fortschreitenden Klimawandels sowie Städtewachstums. Andere halten dagegen, dass sowohl Gründächer als auch stark reflektierende Bedeckungen in einigen Situationen bereits Linderung gebracht haben und eine sorgfältige Planung deren Effizienz sogar verbessern könne. Und laut Stuart Gaffin von der Columbia University in New York solle man Studien, die unerwünschte Nebeneffekte wie eine verminderte Wolkenbedeckung und weniger Regen vorhersagen, nicht überbewerten. Denn zum einen gehören Wolken zu den komplexesten Dingen, die man modellieren kann, und zum anderen erhöhen Städte bereits die Niederschlagsmenge, so der Klimawissenschaftler, indem sie Feinstaub in die Luft blasen.

Ungeachtet all der hitzebedingten Gefahren, mit denen Städte künftig konfron-

tiert sein dürften, haben nur wenige von ihnen Strategien zur Eindämmung des Problems vorgestellt. Louisville in Kentucky ist eine solche Ausnahme: Als erste Großstadt in den USA wird die Stadt ein Konzept zur Anpassung an die steigenden Temperaturen entwickeln, sagt Stone, der das Projekt leitet. Das Engagement wird durch die Not getrieben. Die urbane Wärmeinsel in Louisville erwärmt sich schneller als alle anderen in den Vereinigten Staaten: Seit 1961 stiegen die Temperaturen um mehr als vier Grad Celsius. Dass die Stadt jährlich rund 54 000 Bäume durch Insekten, Schneestürme und mangelnde Pflege verlor, ist sicherlich ein Teil des Problems.

Stone sammelt derzeit die nötigen Basisdaten – diese fehlen den meisten Städten, bevor sie sich um das Problem der steigenden Temperaturen kümmern. Der Forscher erfasst den Baumbestand in und um Louisville, macht besonders betroffene Gebiete ausfindig und identifiziert Bezirke mit schutzbedürftigen Anwohnern. In einem nächsten Schritt soll dann ein genauer Plan erstellt werden, wie sich stark reflektierende sowie begrünte Dächer, Baumpflanzungen und helle Bodenbeläge am

besten kombinieren lassen, um die am stärksten gefährdeten Bewohner der Stadt vor Hitze zu schützen. Stone geht in seinen Modellen von realistischen Annahmen aus – etwa davon, dass 100 Gebäude mit Gründächern ausgestattet werden. Gleichzeitig möchte die Stadt die Zahl der Bäume erhöhen.

Sollte Louisville die von Stone empfohlenen Maßnahmen tatsächlich umsetzen, könnte die Stadt zu einem Versuchsfeld werden und zeigen, wie sich ein Wandel des urbanen Erscheinungsbilds auf Wärmeinseln auswirkt. Dieses Pilotprogramm könnte dann den Weg für andere Städte weisen. »Wir überschreiten bereits jetzt kritische Grenzwerte«, sagt Stone. »Städte beginnen nun allmählich, über offensivere Maßnahmen nachzudenken. Und sie können die Geschwindigkeit, mit der sie sich im Lauf von ein oder zwei Jahrzehnten erwärmen, messbar verlangsamen.« Denn selbst wenn wir schon morgen die Treibhausgasemissionen einstellen, fügt der Forscher hinzu, heize sich die Erde auch in den kommenden Jahrhunderten noch weiter auf. ↩

(Spektrum.de, 29. Oktober 2015)

A large herd of wildebeest is crossing a river, kicking up a thick cloud of dust. The animals are densely packed, and the scene is set against a backdrop of rocky, hilly terrain. The lighting is bright, creating a hazy atmosphere of dust and water spray.

ÖKOSYSTEME

# Wilde Tiere als **Klimaschützer**

von Gunther Willinger

Wenn Tiere in Massen auftreten – oder gerade nicht –, kann das extreme Auswirkungen auf den Kohlenstoffhaushalt haben. Eine Möglichkeit für naturnahen Klimaschutz?

**W**enn zehntausende Gnus durch die Serengeti wandern, wenn Wölfe Elche hetzen oder Wale Krill verschlingen, dann beeinflussen sie den Kreislauf des Kohlenstoffs in ihrem Ökosystem und damit indirekt auch das Klima. Klimaforscher haben sich traditionell auf biogeochemische Prozesse, Pflanzen und Mikroben konzentriert. Doch der Effekt einzelner Tierarten auf den Kohlenstoffkreislauf wurde bislang unterschätzt.

Das zumindest findet der Ökologe Oswald J. Schmitz. Der Forscher von der Yale University ist Hauptautor eines Artikels über den Einfluss von Tieren auf unser Klima ([»Animating the Carbon Cycle«](#)). Wie viele seiner Kollegen meint er, dass die Zusammenhänge in Ökosystemen und die Rolle der Tiere von Klimaforschern und Politikern nicht genügend beachtet werden: »Wildtiere beeinflussen den Austausch von

Kohlenstoff zwischen Land, Meer und Atmosphäre auf vielfältige Art und Weise. Das führt zu Multiplikationseffekten, deren Ausmaß von globaler Bedeutung sein kann.«

### **Gnus und Mistkäfer machen die Serengeti zu einem Kohlenstoffspeicher**

Ein gut untersuchtes Beispiel ist die Serengeti in Ostafrika. In einer intakten Savanne verwandeln Hunderttausende von Weidetieren wie Gnus, Gazellen und Zebras große Mengen Gras und Blätter in Dungfladen. Millionen Mistkäfer rollen den Dung ohne Unterlass zu Kugeln und vergraben diese mit ihren Eiern bestückt im Boden. Sie tun das nicht, um das Klima zu retten, sondern um ihrem Nachwuchs einen ordentlichen Futtermittelvorrat in Form einer Dungkugel mit auf den Weg zu geben. Das Zusammenspiel von Pflanzen, Säugetieren und Insekten sorgt aber für die Bindung großer Mengen Kohlenstoff im Boden und

verhindert, dass sich oberirdisch zu viel brennbares Pflanzenmaterial ansammelt.

In der ersten Hälfte des vorigen Jahrhunderts schrumpften die Gnubestände der Serengeti durch die von Hausrindern eingeschleppte Rinderpest von 1,2 Millionen auf unter 300 000 Tiere. Daraufhin brannten in der Trockenzeit jedes Jahr 80 Prozent der Savanne in riesigen Buschfeuern. Große Mengen Kohlenstoff gelangten in die Atmosphäre. Erst als man 1963 begann, die Kühe rund um den Park mit einem neuen Impfstoff gegen Rinderpest zu impfen, steckten sich die Wildtiere nicht mehr an, und die Gnubestände konnten sich langsam erholen.

Die Ausbreitung der Buschfeuer verringerte sich daraufhin proportional zur Zunahme der Tiere. Wissenschaftler maßen pro Zuwachs von 100 000 Gnus eine zehnpromzentige Verringerung der abgebrannten Savannenfläche. Das gestörte Ökosystem Serengeti verursachte nach Berech-

nungen der Forscher jährlich etwa ebenso viel Kohlendioxidemissionen wie die Verbrennung fossiler Energieträger in ganz Ostafrika. Gnus, Mistkäfer und Savannenbäume haben die Serengeti inzwischen wieder zu einer CO<sub>2</sub>-Senke gemacht. »Der Ausstoß von Kohlendioxid und Methan durch die Atmung beziehungsweise Verdauung der Gnus ist dabei vernachlässigbar gering, denn er macht nur einen Bruchteil der indirekten Effekte durch die Verän-

derung des Ökosystems aus«, erläutert Schmitz und ergänzt: »Wenn wir die ökologischen Zusammenhänge und die Rolle der Tiere besser verstehen und entsprechend handeln, könnte das zu vergleichsweise günstigen Klimaschutzmaßnahmen führen.«

### **Dreiklang aus Wolf, Elch und Wald**

Die Wälder der Taiga, die sich wie ein grünes Band über die Nordhalbkugel unseres Pla-

neten ziehen, speichern etwa ein Drittel des auf der Erde (terrestrisch) gebundenen Kohlenstoffs. Der Elch als großer Pflanzenfresser beeinflusst die Kohlenstoffverteilung in diesem Ökosystem direkt, indem er Pflanzen frisst, die sonst durch Photosynthese atmosphärischen Kohlenstoff binden würden. Und indirekt, indem seine Dung die Nährstoffzusammensetzung der Streuschicht verändert und so das Baumwachstum bremst. Kleinere Bäume und Baumkronen führen zu wärmeren und trockeneren Böden und damit zu besseren Bedingungen für Waldbrände.

Unterm Strich bringen so unnatürlich große Elchpopulationen mehr CO<sub>2</sub> in die Atmosphäre. In Nordamerika staksen statistisch gesehen 1 bis 1,5 Elche pro Quadratkilometer durch die Wälder – zu viele in den Augen der Ökologen. Würde sich der Bestand bei ungefähr 0,5 Elchen pro Quad-

### **VERBRANNT ERDE**

**Große Tierherden halten den Bewuchs der Savanne kurz – und verhindern so die Ausbreitung von Flächenbränden. Durch Förderung der Tierherden reduziert sich im Gegenzug auch die Produktion von Kohlendioxid.**



ISTOCK / SEARAGEN



## **ELCHE ALS KLIMASÜNDER?**

**Fehlen Raubtiere, wächst die Population großer Pflanzenfresser oftmals auf unnatürliche Weise – mit negativen Konsequenzen für die Kohlenstoffbilanz eines Ökosystems.**

ratkilometer einpendeln, könnte dies der Atmosphäre durch das gesteigerte Pflanzenwachstum annähernd so viel Kohlenstoff ersparen, wie die Industrienation Kanada jedes Jahr bei der Verbrennung fossiler Energieträger in die Luft pustet, erläutern Schmitz und Kollegen. Die Wiederherstellung einer natürlichen Wolfspopulation in den borealen Wäldern Nordamerikas wäre daher nach Ansicht der Forscher eine effektive Klimaschutzmaßnahme. »Politiker denken beim Klimaschutz oft zuerst an kostspielige technische Lösungen. Das war bislang nur mäßig erfolgreich. Wir brauchen neue Konzepte und praktikable Maßnahmen, um den Kohlenstofffluss in die Atmosphäre zu begrenzen. Die natürliche Bindung von Kohlenstoff in den Ökosystemen auf nationaler und regionaler Ebene könnte hierzu ein viel versprechender Ansatz sein«, argumentiert Schmitz.

### **Die Walpumpe stottert**

Auch in den Ozeanen, unserem wichtigsten Kohlenstoffspeicher, spielen Tiere eine ökologische Hauptrolle. Manche Wissenschaftler vergleichen die Durchmischung verschiedener Wasserschichten durch Meerestiere mit der Kraft von Wind, Wel-



**WALE FÜTTERN GANZE ÖKOSYSTEME**  
Manche Wale holen mit ihrer Nahrung Nährstoffe aus der Tiefsee an die Oberfläche – dort setzen sie diese in Form von Kot frei. Die »Walpumpe« verringert den Ausstoß von Kohlenstoffdioxid.

ISTOCK / KENNETH WIEDEMANN

len und Gezeiten. Einen erheblichen Anteil daran tragen die größten Lebewesen des Planeten, die Wale. Im Südpolarmeer vertilgen Riesen wie Blau-, Finn- oder Pottwale große Mengen Krill, Fisch und Tintenfisch, die sie oft in Tiefen zwischen 200 und 1000 Metern finden. Wegen der angenehmeren Druckverhältnisse entleeren sie ihren gigantischen Darm aber lieber nahe der Oberfläche und transportieren dabei große Mengen wertvoller Nährstoffe aus der Tiefe nach oben. Der wichtigste davon ist Eisen, ein Schlüsselement für viele biochemische Prozesse wie die Photosynthese.

Eisen ist im sauerstoffreichen Meerwasser nur sehr schwer löslich und daher in den Weiten des Südpolarmeers hauptsächlich in den Tieren und deren Hinterlassenschaften verfügbar. Die Wale düngen mit ihren Kotwolken Kieselalgen und andere Bestandteile des Phytoplanktons. Ausreichend mit Eisen versorgt setzen die Meeresalgen ihre Fotosynthesemaschinerie in Gang und produzieren aus Sonnenlicht und CO<sub>2</sub> energiereiche Zuckerverbindungen. Blühen die Algen, freut sich auch der Krill, denn das Phytoplankton ist die Leibspeise der kleinen Krebse.

Damit schließt sich der Kreis. Das Eisen wandert innerhalb des Ökosystems vom Krill über die Wale zu den Algen und wieder zum Krill. Je besser diese »Walpumpe« läuft, desto mehr CO<sub>2</sub> wird durch die Algen im System gebunden. Abgestorbene Algen sinken in die Tiefsee, wo der in ihnen enthaltene Kohlenstoff auf lange Zeit gespeichert bleibt. Ohne Wale gerät der Kreislauf ins Stocken, und die Kohlenstoffspeicherkapazität des Meers geht zurück.

Dass die Walpumpe seit geraumer Zeit erheblich stottert, zeigt der rapide Rückgang der Krillbestände und ein Blick auf die Blauwale. Die industriellen Walfänger töteten zwischen 1904 und 1972 mehr als 345 000 antarktische Blauwale. **Weniger als 400 Tiere** waren übrig, als die Art schließlich geschützt wurde. Die Bestände erholen sich seither extrem langsam. Meeresbiologen rechnen heute mit gut 2000 Tieren. Victor Smetacek, Meeresökologe und Professor emeritus am Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung (AWI) in Bremerhaven sagt: »Der Verlust der großen Wale hat ein Loch in das Ökosystem Südpolarmeer gerissen, und das zeigt sich auch am Krill. Die unvorstellbaren Krillmassen, die einst die südlichen

Meere auf Hunderten von Kilometern rot färbten, sind seit den 1970er Jahren um 80 Prozent geschrumpft. Weniger Krill und weniger Wale könnten das antarktische Ökosystem kippen lassen – in jedem Fall bedeutet es aber eine deutliche Reduktion der CO<sub>2</sub>-Aufnahme durch das Meer.«

Neben Walen und Krill haben die Forscher weitere tierische Klimaschützer in den Meeren ausgemacht. Seeotter erhalten Tangwälder, indem sie Tang fressende Seeigel knacken, und die zu den Manteltieren gehörenden Riesen-Appendikularien lassen ihre schleimigen, kohlenstoffhaltigen Hüllen massenhaft in die Tiefsee fallen. Dank aufwändiger Grundlagenforschung beginnen wir die Wirkung einzelner Tierarten im jeweiligen Ökosystem zu verstehen. Vielleicht hilft uns dieses Wissen ja dabei – wie im Fall der Serengeti – eine Erholung der Ökosysteme einzuleiten.

Ein Meilenstein könnte die anstehende UN-Klimakonferenz in Paris werden. Wenn es nach den Wissenschaftlern geht, sollten Wale, Wölfe und Gnus an den dortigen Verhandlungstischen eine ebenso wichtige Rolle spielen wie in ihren Ökosystemen. ↩

(Spektrum.de, 27. November 2015)



FORSTWIRTSCHAFT  
Dem Wandel  
gewachsen  
von Hillary Rosner

Die Klimaerwärmung bedroht Kanadas Wälder. Um sie fit zu machen für höhere Temperaturen, wollen Forscher Bäume aus südlicheren Gefilden einführen, die den heimischen Beständen ihre Gene für Hitzetoleranz vererben.

**A**uf einem Feld in Vancouver, am Straßenrand direkt gegenüber einer Häuserreihe, stehen ungefähr 500 Sitka-Fichten dicht an dicht und recken ihr dunkelgrünes Nadelkleid der Sonne entgegen. Obwohl alle vor sieben Jahren gleichzeitig gepflanzt wurden, variiert ihre Größe dramatisch. Die kleinsten sind nur ungefähr 60 Zentimeter hoch und stammen von der Kodiak-Insel in Alaska; die größten dagegen bringen es auf rund zwei Meter und kommen aus Oregon. Doch die Größe ist nicht der einzige augenfällige Unterschied. Obwohl die Fichten aus Alaska zur selben Art gehören wie diejenigen aus Oregon, knospen sie volle drei Monate früher. Zudem bleiben sie üppig grün, egal wie tief die Temperaturen fallen.

Die Pflanzung am Rand des weitläufigen Campus der University of British Columbia ist Teil eines Experiments mit dem Ziel,

die kanadischen Wälder vor den Folgen des drohenden Klimawandels zu schützen. Bäume sind an ihren Lebensraum angepasst. Doch der verändert sich in dem Maße, wie die Erde sich erwärmt. Nun können Bäume nicht einfach losmarschieren und sich ein neues Habitat suchen. Wenn sie es nicht schaffen, mit dem Klimawandel Schritt zu halten, sind sie dem Untergang geweiht.

Da die Bäume selbst ortsgebunden sind, erproben Wissenschaftler eine neue Lösung: Sie wollen den Genen die Chance geben, zu wandern – und den Pflanzen so dazu verhelfen, sich genetisch den veränderten Umweltbedingungen anzupassen. Für dieses Experiment hat Sally N. Aitken die Fichtenschonung in Vancouver gepflanzt. Sie ist Direktorin des Centre for Forest Conservation Genetics an der örtlichen Universität. Ihrer Ansicht nach könnte die Rettung der Wälder in British

AUF EINEN BLICK

## Bäume für den Klimaschock rüsten

- 1 Wälder passen sich genetisch an die lokalen Umweltbedingungen an; der heutige Klimawandel vollzieht sich jedoch so schnell, dass sie nicht mithalten können.
- 2 Deshalb versuchen Wissenschaftler die Evolution zu beschleunigen, indem sie Bäume mit Genen für Hitzetoleranz und geringen Wasserbedarf neben solche setzen, die diese Gene beziehungsweise Eigenschaften künftig benötigen; dann können sich beide miteinander kreuzen.
- 3 Diese neue Strategie – »assisted gene flow« (AGF) – wird derzeit in verschiedenen Klimazonen in British Columbia getestet. Forstwirtschaft

Columbia – und andernorts – von einem Verfahren abhängen, das »assisted gene flow« heißt. Wissenschaftler verpflanzen dabei Organismen mit vorteilhaften Eigenschaften von einer Stelle ihres Verbreitungsgebiets an eine andere, wo sie ihre besonderen Erbanlagen an die angestammte Flora weitergeben können. So besitzen die Bäume aus Oregon und die aus Alaska vielleicht wechselseitig nützliche Gene. Doch ohne menschliches Zutun kommen beide niemals zusammen.

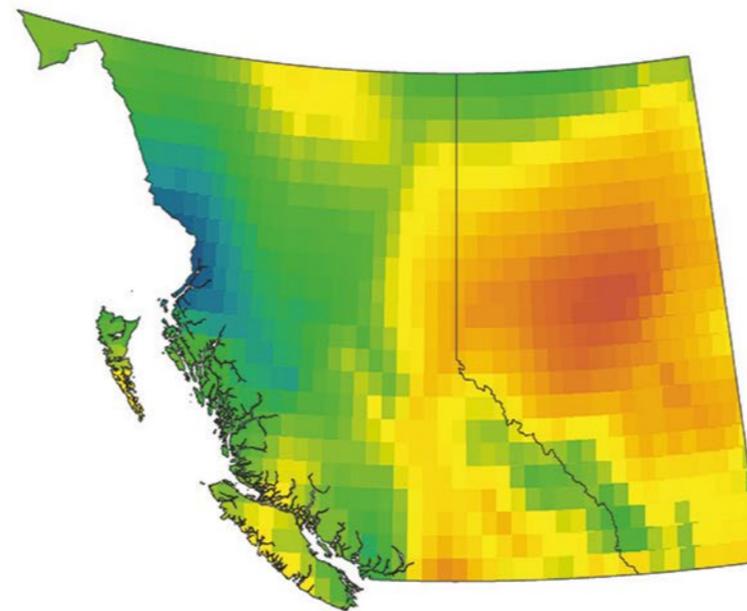
Förster können hier nachhelfen, indem sie beispielsweise Setzlinge von Fichten oder Küstentannen aus niedrigen Breitengraden nehmen und sie bei etwas höheren einpflanzen. Wenn dort dann im Zuge der globalen Erwärmung die Durchschnittstemperatur steigt, sollten die Bäume am neuen Standort problemlos gedeihen, sich mit verwandten Arten vor Ort kreuzen und so ihre auf die Wärme zugeschnittenen Gene verbreiten. Der Wald insgesamt würde sich dadurch anpassen. Insofern bildet der »assisted gene flow« ein Mittel, der Evolution behutsam auf die Sprünge zu helfen.

Doch ganz so simpel ist die Sache nicht. Man kann nicht einfach einen Baum aus Oregon 1000 Meilen weiter nördlich in Bri-

## Wettertrends für Bäume

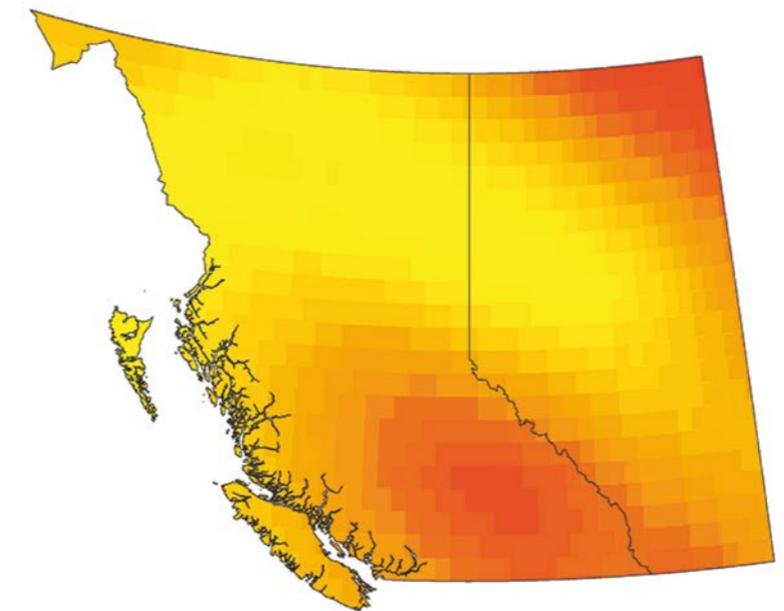
Wie stark sich das Klima im Westen Kanadas bereits gewandelt hat, zeigt der Vergleich der gemittelten Wetterdaten in den Zeitspannen von 1961 bis 1990 und 1997 bis 2006. Im Durchschnitt haben die Niederschläge entlang der Pazifikküste stark zugenommen, wodurch es inzwischen immer öfter zur früher seltenen Kiefernschütte durch Pilzbefall der Nadeln kommt. Weiter im Landesinneren ist das Klima dagegen trockener geworden, was erklären könnte, warum dort vermehrt Fichten und Espen eingehen. Dass es im Winter heute überall wärmer ist, begünstigt zudem die Ausbreitung des schädlichen Bergkieferkäfers.

(Die Methoden für diese Analysen wurden 2009 in der Fachzeitschrift »Agricultural and Forest Meteorology« publiziert.)



### Veränderung der Niederschläge

prozentuale Abweichung vom früheren Mittelwert



### Veränderung der Wintertemperatur

Abweichung vom früheren Mittelwert in Grad Celsius



tish Columbia einpflanzen und darauf warten, dass es dort wärmer wird. Der Grund sind genau jene lokalen Anpassungen, die den »assisted gene flow« attraktiv erscheinen lassen. Küstenkiefern zum Beispiel wachsen in sehr verschiedenen Regionen Kanadas und haben je nach ihrem Standort besondere Gene, die ihnen helfen, Hitze, Kälte oder Trockenheit zu ertragen oder lokal vorkommende Krankheiten oder Schädlinge abzuwehren. Wenn dann eine arktische Kaltfront durch Vancouver zieht und auf Setzlinge aus wärmeren Regionen trifft, bekommt das denen nicht gut. Denn ihnen fehlen die speziellen genetischen Anpassungen für das Gedeihen in ihrem neuen Lebensraum. »Wir müssen die Sache in ganz kleinen Schritten angehen«, sagt Aitken. »Obwohl die in einigen Jahrzehnten zu erwartenden Veränderungen erheblich sind, ist bis dahin noch mit wochen-, monate- oder jahrelangen Unterbrechungen des allgemeinen Erwärmungstrends zu rechnen, die diese Bäume überleben müssen.«

### **250 Millionen Setzlinge jährlich**

Herauszufinden, wie man die heutigen Wälder am besten für das Klima von mor-

gen rüsten kann, ist keine leichte Aufgabe. Doch in British Columbia, wo die Forstwirtschaft für ein Drittel aller Exporte aufkommt und die Hälfte des Baumbestands kommerziell verwertet wird, kommt ihr große Bedeutung zu. Gesetze schreiben eine Wiederaufforstung nach dem Fällen vor, um den Holznachschub und gesunde Ökosysteme zu gewährleisten. Ungefähr 250 Millionen Setzlinge werden jährlich gepflanzt. Woher sollten sie kommen, und wie weit entfernt von ihrem Ursprungsort kann man sie einpflanzen? Das sind ebenso knifflige wie drängende Fragen. Eine falsche Entscheidung könnte die Wälder für Jahrzehnte ruinieren.

In dem kleinen Experiment mit den Sitka-Fichten untersucht Aitken Bäume von 14 unterschiedlichen Standorten zwischen Kalifornien und Alaska. So will sie Erfahrungen sammeln, um massive Fehler bei Projekten größeren Ausmaßes zu vermeiden. Ihr Team konnte bereits 35 DNA-Segmente identifizieren, die einen Einfluss darauf haben, wie kälteempfindlich die Fichten sind und wann sie austreiben. Mittlerweile durchmustern die Forscher das Erbgut der Bäume auch nach Genen, die mit der Beständigkeit gegen andere Umwelt-

einflüsse zusammenhängen. Solche günstigen Versionen sollen sich dann in Populationen verbreiten, die genau diese Eigenschaften benötigen – und zwar so schnell, dass die Veränderungen mit dem Klimawandel Schritt halten.

Dieses größere Projekt namens Adapt-Tree könnte wegweisend sein für ähnliche Vorhaben auf der ganzen Welt. Langfristig profitieren vielleicht sogar andere Biotope davon – zum Beispiel Korallenriffe, die ebenfalls durch den Klimawandel bedroht sind. Forscher in den Vereinigten Staaten, Abu Dhabi, Katar und Australien haben vorgeschlagen, Korallen aus dem Persischen Golf in den Indopazifik zu verpflanzen, wo sie ihre Gene für Hitzetoleranz weitergeben könnten. Ebenso gibt es Versuche, mit Samen aus vielerlei Lebensräumen das Grasland im Mittleren Westen der USA wiederherzustellen.

Aitken und Michael C. Whitlock, Populationsgenetiker am zoologischen Institut der University of British Columbia, haben den Begriff »assisted gene flow« in einer Publikation aus dem Jahr 2013 geprägt. Schon länger verfolgen Wissenschaftler und Umweltschützer eine noch kühnere Idee, nämlich die assistierte Migration.

Hierbei werden Arten weit entfernt von ihrem Herkunftsort und außerhalb ihres natürlichen Verbreitungsgebiets angesiedelt. »Assisted gene flow« ist ein gemäßigerer Ansatz, der vor allem auf die Übertragung der Gene zielt. Nach dem erfolgreichen Abschluss von AdapTree in ein paar Jahren werden DNA-Sequenz-Daten für 12 000 Kiefern und Fichten vorliegen, die von mehr als 250 Populationen aus British Columbia und Alberta stammen.

Diese Bäume spüren die Folgen des Klimawandels bereits. In den 1970er Jahren ließ die Regierung von British Columbia eine Karte mit den verschiedenen biogeoklimatischen Zonen in der Provinz erstellen. 40 Jahre lang bildete diese Karte die Grundlage für die waldbaulichen Planungen im westlichen Kanada und gab Auskunft darüber, welche Setzlinge wo zu pflanzen sind. Inzwischen ist sie aber durch den Klimawandel zu großen Teilen überholt. Einige Zonen haben sich verschoben,

## **PINIENSAMEN**

**Im Rahmen des AdapTree-Experiments nehmen Wissenschaftler Piniensamen aus unterschiedlichen Lebensräumen.**





andere sind dramatisch geschrumpft. Manche Lebensräume in höheren Regionen und auf einigen Hochebenen sind schon zur Hälfte verloren gegangen und dürften bis 2100 zu 80 Prozent verschwunden sein. Setzlinge von Bäumen, die einst in einer bestimmten Region gediehen, gehen dort heute ein. Die Lebensräume verwandeln sich und bringen Ökosysteme hervor, die sich von den früheren völlig unterscheiden – wobei freilich umstritten ist, ab wann ein Ökosystem als »völlig verändert« gelten kann.

### **Logenplatz im Drama der globalen Erwärmung**

Die Anpassungsfähigkeit einer bestimmten Population hängt entscheidend davon ab, wie schnell sich die Individuen fortpflanzen. In jeder Generation können neue nützliche Eigenschaften aufkommen. Ein Käfer, der sich rasch vermehrt, hat wesentlich bessere Aussichten, sich anzupassen, als ein Baum, der sehr lange lebt und sich nur langsam fortpflanzt. In seiner kurzen

**PINIENKEIMLINGE IM GEWÄCHSHAUS**  
**Diese lassen sie im Gewächshaus keimen.**



Lebensspanne spürt das einzelne Insekt keine nennenswerte Veränderung. Ein Baum dagegen sitzt im Drama der globalen Erwärmung gleichsam auf einem Logenplatz.

Frisch gepflanzte Bäume sind vor allem in den ersten 20 Jahren gefährdet, dann werden sie widerstandsfähiger und »können ungünstige Umstände eine Weile verkraften«, wie Brad St. Claire, Genetiker am U.S. Forest Service in Corvallis in Oregon, es ausdrückt. Doch in Zeiten der globalen Erwärmung steht zu befürchten, dass sich die lokalen Bedingungen bereits in den kritischen ersten Dekaden beträchtlich verändern.

»Wenn man Pflanzen in höhere Breiten bringt, damit sie an das künftige Klima angepasst sind, dann müssen sie mit der jetzt noch herrschenden Kälte dort zurechtkommen«, sagt St. Clair. »Wir haben ein bewegliches Ziel«, räumt auch Aitken ein. »In welchem Entwicklungsstadium sollen die Bäume optimal an das Klima angepasst

## PINIEN TRIEBE

**Anschließend vergleichen sie Größe und Form der Triebe.**

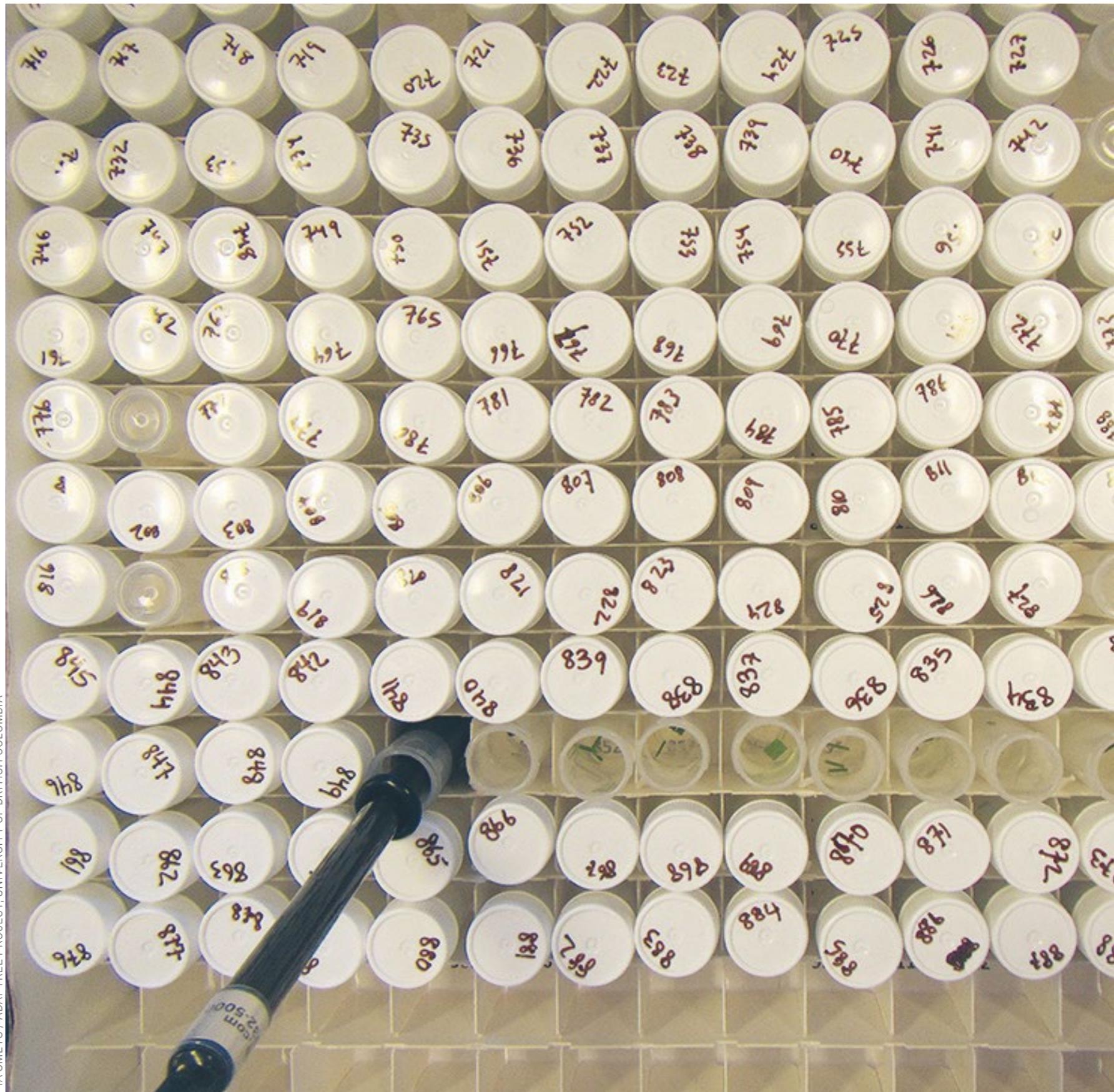
sein? Schon als Setzlinge, im Alter von zehn oder gar erst von 30 Jahren?» Eine naheliegende Möglichkeit, das Risiko zu minimieren, besteht darin, die Biodiversität zu erhöhen, indem man lokale Varietäten zusammen mit fremden anpflanzt. »Dabei wollen wir nicht auf jedem Hektar das Gleiche machen; denn man sollte nicht nur für ein einziges Klimawandelszenario planen«, so Aitken.

»Assisted gene flow« erscheint jedenfalls als probates Mittel, für mehr genetische Vielfalt zu sorgen. Das Ziel muss dabei sein, den Genpool der Wälder mit Elementen anzureichern, die ihre Widerstandskraft stärken. Während sich die Umwelt verändert, leiden einige Bäume vielleicht zunächst, andere aber verfügen über Erbmaterial, das ihnen durch raue Zeiten hilft. »Da sich bevorzugt diejenigen Bäume fortpflanzen, die robuster sind«, sagt Aitken,

## PINIENTRIEBE IM LABORTEST AUF FROSTBESTÄNDIGKEIT

**Die Nadeln werden auf ihre Frostbeständigkeit geprüft.**

PIA SMETS / ADAPT TREE PROJECT, UNIVERSITY OF BRITISH COLUMBIA



»erwarten wir Populationen, die zunehmend besser mit den herrschenden Bedingungen fertigwerden.« Am wichtigsten sei es, in der Anpassungsphase genug gesunde Bäume zu erhalten, die überleben und sich vermehren.

Aitken ist sehr heimat- und naturverbunden: Sie geht oft wandern und unternimmt gerne Schitouren; außerdem besitzt sie eine kleine Blockhütte in den Wäldern von British Columbia. Allein aus diesem Grund hofft sie, dass ihre Arbeit zu einer neuen, klügeren Strategie in der Forstwirtschaft beiträgt. Ohne »assisted gene flow« käme es, so fürchtet sie, zu einem allmählichen Niedergang der Bäume an den Rändern ihres jeweiligen Verbreitungsgebiets. »Bäume können zwar auch unter widrigen Umständen lange überleben, aber sie verlieren die Fähigkeit, sich fortzupflanzen«, sagt Aitken. »Das wäre für die Wälder langfristig das Todesurteil. Sie beständen dann gewissermaßen nur noch aus lebenden Leichen.« Und zu allem Übel würden die Baum-Zombies Raum und Sonnenlicht beanspruchen – Ressourcen, welche die Keimlinge dringend benötigen.

Zur Mitte eines Ausbreitungsgebiets hin wäre die Situation nicht ganz so drama-

tisch. Doch auch dort würden die Bäume wohl langsamer wachsen und sich nur mit Mühe behaupten. Heißt das, dass sie letztlich ebenfalls zu Grunde gingen? »Wahrscheinlich nicht«, meint Aitken. »Innerhalb einer Population gibt es viel Variation. Deshalb werden die Arten wohl nicht aussterben, aber unsere Wälder dürften auf Dauer sehr ungesund aussehen.« Das zöge andere Pflanzen und Tiere in Mitleidenschaft, weil sich ganze Ökosysteme um Bäume ranken – bieten diese doch vielen anderen Organismen Nahrung und Schutz, regulieren den Wasserhaushalt und verhindern die Bodenerosion.

Mit ihrem Ansatz stößt Aitken in eine Lücke: Bisher ist das Versetzen einzelner Bäume innerhalb ihres normalen Verbreitungsgebiets wenig untersucht worden. Dabei sind die ökologischen Risiken geringer als beim Anpflanzen völlig fremder Arten, weil diese nicht Teil des angestammten Ökosystems sind – auch wenn sie einige erwünschte Eigenschaften mitbringen.

Der »assisted gene flow« birgt allerdings gleichfalls Risiken. Im schlimmsten Fall könnten etwa zusammen mit den nützlichen Genvarianten auch solche eingeführt werden, welche die Überlebenschance ei-

ner größeren Population verschlechtern. »Das Problem sollte sich jedoch von selbst lösen«, meint Andrew Weeks, Genetiker an der University of Melbourne. »Die natürliche Selektion würde die nachteiligen Varianten mit der Zeit ausmerzen. Indem man den Genpool erweitert, eröffnet man der Population zweifellos die besten Zukunftschancen.«

Die Wälder British Columbias erwirtschaften jährlich zehn Milliarden Dollar und sind auch sonst von vielerlei Nutzen, indem sie beispielsweise Überflutungen und die Bodenerosion verhindern. Sie angesichts des Klimawandels einfach ihrem Schicksal zu überlassen, wäre fahrlässig, zumal sich die Auswirkungen der globalen Erwärmung bereits zu zeigen beginnen. Seit Mitte der 1990er Jahre haben Invasionen von Schädlingen und Waldbrände – die beide mit den erhöhten Temperaturen zusammenhängen – Millionen von Hektar Wald vernichtet und viele Häuser zerstört. »Die Natur hat schon mehrere Warnschüsse in Sachen Erderwärmung abgegeben«, sagt Greg O'Neill, Wissenschaftler beim Ministry of Forests, Lands and Natural Resource Operations von British Columbia. Durch die Insekten und Brände ist der Kli-

mawandel ins Bewusstsein der Menschen hier gedrungen: »Es handelt sich um keine abstrakte Gefahr irgendwann in der Zukunft, wir stecken schon mittendrin.«

### **Schwindel erregende Masse an Daten**

Die Schäden haben auch die Regierung zum Handeln bewogen. 2009 begann British Columbia, die Vorschriften für das Ausbringen von Setzlingen zu überarbeiten. Im gleichen Jahr startete O'Neill einen Versuch zur assistierten Migration, um herauszufinden, ob, wo und wie Förster nach dem Holzeinschlag ganz andere Arten als vorher ansiedeln könnten. An 48 verschiedenen Stellen in Kanada und den westlichen Vereinigten Staaten – von Whitehorse bis Sacramento – pflanzten Wissenschaftler 15 Arten wirtschaftlich wichtiger Bäume, die teils von tausende Meilen entfernten Standorten stammten.

Diese extreme Migration dient zunächst einmal rein wissenschaftlichen Zwecken, um herauszufinden, wie die Bäume den Ortswechsel vertragen. Es geht nicht um einen generellen Leitfaden für das Verpflanzen über weite Distanzen hinweg. Die Erkenntnisse sind sehr allgemeiner Natur – »etwas in der Art wie ›Pflanze

diesen Baum nicht in geringerer Höhe oder weiter südlich‹«, sagt O'Neill. Auf jeder Testfläche gibt es eine Wetterstation, und die Versuchsergebnisse sollen zeigen, wie das Überleben und Gedeihen der Setzlinge von den lokalen Bedingungen abhängt. Dann lässt sich, so der Forscher, auch die Reaktion der Bäume auf den Klimawandel vorhersagen.

Die genetischen Analysen von AdapTree liefern ähnliche Prognosen auf einem anderen Weg. In dem sich stetig ausweitenden Projekt haben Wissenschaftler das Erbgut von Millionen von Engelmann-Fichten und Küstentannen nach interessanten DNA-Sequenzen durchkämmt und dazu eine schnelle Screening-Methode entwickelt, die derjenigen ähnelt, welche die Firma 23andMe für die Analyse menschlicher Genome einsetzt. Man betrachtet ungefähr 50 000 kurze Abschnitte des genetischen Codes, in denen jeweils ein Basenpaar variiert, weshalb sie Einzelnucleotid-Polymorphismen (single nucleotide polymorphisms, SNPs) heißen, und versucht festzustellen, welche davon mit der Anpassung an den jeweiligen Standort zusammenhängen. Bei den bisherigen Untersuchungen an 600 jungen Bäumen gelang

---

»Oft gab es Fehlschläge, weil die Bedingungen für das Gedeihen auf dem fremden Boden nicht ausreichend bekannt waren«

[Glenn Howe]

---

es, genetische Marker zu identifizieren, die viele der beobachteten Unterschiede in der Toleranz gegenüber Kälte, Hitze und Trockenheit erklären. Die Masse an Rohdaten ist Schwindel erregend. Beidseitig auf Din-A4-Blättern ausgedruckt, ergäben sie einen 150 Kilometer hohen Papierstapel, wie Aitkin veranschaulicht. Und das ist nur ein Teil der Information. Die Wissenschaftler untersuchen nun, wie die Gene tatsächlich funktionieren, also wie die darin verschlüsselten Instruktionen ausgeführt werden, wenn die Bäume unter Stress durch Hitze oder Trockenheit geraten.

Einige Breitengrade weiter südlich beginnen auch Spezialisten des U.S. Forest Service das Für und Wider des »assisted gene flow« abzuwägen. In den Vereinigten Staaten haben Förster traditionell wenig auf Klimaunterschiede innerhalb der Verbreitungsgebiete von Bäumen geachtet, wenn sie Pflanzungen vornahmen. Die regionale Temperaturvariation erschien einfach zu gering, um sich negativ auszuwirken. Doch inzwischen ist auch hier das Bewusstsein für die Bedeutung des Mikroklimas gewachsen.

Schon immer haben Menschen Bäume in andere Regionen oder gar Kontinente

verpflanzt. »Oft gab es Fehlschläge, weil die Bedingungen für das Gedeihen auf dem fremden Boden nicht ausreichend bekannt waren«, sagt Glenn Howe, Waldgenetiker an der Oregon State University. Das brachte die Forstverwaltungen mit der Zeit dazu, auf Nummer sicher zu gehen. In den westlichen Vereinigten Staaten sind die ausgewiesenen Pflanzgebiete für Bäume eng umgrenzt. »Das ist in einem stabilen Klima wahrscheinlich sinnvoll«, sagt Howe. »Wenn sich das Klima ändert, könnte allzu restriktives Vorgehen jedoch zum Problem werden.«

British Columbia stellt sich der Herausforderung. Die Schwierigkeiten sind dabei nicht nur wissenschaftlicher Art, sondern betreffen ebenso die Verwaltung. So verfügt die zentrale staatliche Samenbank von British Columbia über Saatgut für mehr als sechs Milliarden Bäume. Diesen Bestand kann man nicht über Nacht komplett erneuern. Als zäh erweisen sich auch überkommene Vorstellungen und Verhaltensweisen: Wissenschaftler müssen die Forstverwaltungen dazu bringen, den Ergebnissen der Genanalysen zu vertrauen und nicht nur dem, was sie mit eigenen Augen in der freien Natur sehen. Es kommt

entscheidend darauf an, all die Einzelnukleotid-Polymorphismen und Sequenzdaten in »ein Lexikon für Förster zu übersetzen«, betont Aitken.

Denn letztendlich stecken dahinter lebende Bäume, die als unersetzliche Naturschätze unser aller Leben in vielfältiger Weise bereichern. Um unter veränderten Umweltbedingungen überleben zu können, müssen sich manche von ihnen neue Territorien erschließen. Und dafür benötigen sie unsere Hilfe. ↩

(Spektrum der Wissenschaft, 12/2015)

Aitken, S. N., Whitlock, M. C.: Assisted Gene Flow to Facilitate Local Adaptation to Climate Change.

In: Annual Reviews of Ecology, Evolution, and Systematics 44, S. 367 – 388, 2013

Lotterhos, K. E., Whitlock, M. C.: Evaluation of Demographic History and Neutral Parameterization on the Performance of FST Outlier Tests.

In: Molecular Ecology 23, S. 2178 – 2192, 2014

Pedlar, J. H. et al.: Placing Forestry in the Assisted Migration Debate.

In: BioScience 62, S. 835 – 842, 2012

BIOMASSE

# WIE GRÜN IST DIE ENERGIE AUS DEM WALD?

von Gunther Willinger

Die Energiegewinnung aus Holz erlebt in Europa seit Jahren eine Renaissance. In Deutschland wurde im Jahr 2010 erstmals mehr Holz verbrannt als stofflich genutzt, 2014 kam knapp ein Drittel der erneuerbaren Energien aus der Holzverbrennung. In Europa ist es sogar fast die Hälfte. Die starke Nachfrage nach Energieholz verändert die Forstwirtschaft, und es stellt sich die Frage: Was können wir dem Wald zumuten?

**H**olz ist im Kommen – auch und vor allem wieder, um daraus Wärme und Strom zu gewinnen. Laut Umweltbundesamt »ist die Holzentnahme in Deutschland seit 2002 deutlich angestiegen, und ein Großteil des nutzbaren Zuwachses wird bereits eingeschlagen«. Das bestätigt Rainer Luick von der Hochschule für Forstwirtschaft in Rotenburg: »Die Ergebnisse der letzten Bundeswaldinventur zeigen, dass schon fast alle verfügbaren Ressourcen in unseren Wäldern genutzt werden.« Das durchschnittliche Alter deutscher Wälder liegt bei 77 Jahren. Nur auf zwei Prozent der Waldfläche wachsen Bäume, die älter als 180 Jahre sind. Und Naturwaldreservate machen sogar gerade einmal 0,3 Prozent

des Waldbestandes aus, wo sich das Ökosystem natürlich entwickeln darf.

Entsprechend sieht Forstökologe Luick bei Alter und Struktur deutscher Wälder noch viel Luft nach oben: »Den Luxus, dass wir unsere Wälder nachhaltig bewirtschaften können, haben wir erst seit den 1950er und 1960er Jahren, als man beim Heizen zu Kohle und Öl übergegangen ist. Dem verdanken wir, dass die Vorräte in unseren Wäldern überhaupt wieder angewachsen sind. Trotzdem sind sie noch vergleichsweise jung. Wir haben nach wie vor große Defizite bei Humusbildung und Totholzanteil, und ein größerer Vorratsaufbau wäre auch aus ökologischer und Klimaschutzsicht sinnvoll. Momentan sind wir bei durchschnittlich 300 Vorratsfestmetern Holz pro Hektar – 500 bis 600 wären aber

durchaus realistisch.« Auch Daniela Thrän, Mitglied im Bioökonomierat der Bundesregierung und Leiterin der Abteilung Bioenergie am Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung (UFZ) in Leipzig, berichtet, dass in einigen Regionen, etwa in Baden-Württemberg, die Holznutzung als »zunehmend intensiv« empfunden wird. Andererseits hat sich die deutsche Forstwirtschaft auch in Richtung Naturverjüngung und naturgemäßen Waldbau entwickelt, seit Orkan »Wiebke« 1990 durch die Fichtenwälder fegte.

### **Undurchsichtig wie ein Dschungel**

Klar ist, dass der steigende Bedarf an Energieholz den Druck auf die Wälder erhöht. Zur Produktion der in den letzten Jahren boomenden Holzpellets wird hier zu Lan-



## NATURWALD

Nur 0,3 Prozent der deutschen Waldfläche gelten als Naturwaldreservate, wo die Bäume sich frei entwickeln und sterben dürfen.

de zwar noch hauptsächlich das Restholz der Sägewerke verwendet. Zunehmend landen aber auch die Kronenbereiche der Bäume in den Pelletierungs- oder Brikettanlagen, weshalb dem Wald wichtige Nährstoffe wie Kalium und Magnesium fehlen. Teilweise wird dann großflächig Kalk ausgebracht, um dem Nährstoffverlust im Waldboden entgegenzuwirken.

Gefährdet die Renaissance des Brennholzes also den naturnahen Waldbau? Joachim Radkau, der sich als Professor für Neuere Geschichte an der Universität Bielefeld mit dem Thema Holznutzung auseinandergesetzt hat, gab 2011 in einem Vortrag auf der Holzmesse Ligna in Hannover zu bedenken: »[...] ich gestehe, dass mich der Gang durch den gewaltigen Maschinenpark zur Produktion von Pellets und Hackschnitzeln nachdenklich gemacht hat. Wenn man da Maschinen angeboten sieht, die dicke Baumstämme ruckzuck zu patenten Brennstoffen zerschreddern, so demonstriert dies, in welchem Maß der so genannte technische Fortschritt das Kaschadenprinzip der Holznutzung (Beschränkung der energetischen Nutzung auf Holzreste und Altholz) überrollt.« Laut Radkau wurden schon 2011 über die Hälfte der

dukte und soll nun auch auf Schweizer Energieholz ausgeweitet werden.

### **Brennpunkt Osteuropa**

Der Blick der Holzindustrie richtet sich mittlerweile verstärkt nach Osteuropa, wo zunehmend Raubbau stattfindet. Besorgnis erregende Entwicklungen lassen sich etwa in den Karpaten beobachten, deren urtümliche Wälder sich von Polen und der Slowakei bis nach Rumänien und in die Ukraine erstrecken. Diese Wälder beherbergen etwa die Hälfte aller europäischen Bären, Wölfe und Luchse – und verschwinden in hohem Tempo. [Laut einer gerade erschienenen Studie zählen osteuropäische Länder wie Polen, Weißrussland, Litauen, aber auch Österreich, Ungarn, die Slowakei und Schweden zu den globalen Hotspots beim Verlust von Waldflächen in artenreichen Lebensräumen.](#)

Wie die europäische Waldschutzorganisation Fern berichtet, [werden im Osten der Slowakei alte Buchenwälder für die Holzenergieproduktion abgeholzt. Es gibt Einschlaggenehmigungen in Schutzgebieten wie dem Poloniny-Nationalpark, und EU-Gelder werden zum Ausbau der Infrastruktur verwendet.](#) »Ein Großteil der letzten

Buchenurwälder, die es in der Europäischen Union heute noch gibt, befindet sich in Rumänien. Doch Woche für Woche werden dort Tausende von Bäumen legal und illegal gefällt«, beklagt Gabriel Schwadener, Geschäftsführer der international tätigen Naturschutzstiftung EuroNatur. Die rumänische Umweltorganisation Agent Green meldet aktuell Kahlschläge in den Wäldern der Tarcu-Berge, im Südwesten des Landes. Greenpeace Russland hat anhand von hochauflösenden Satellitenbildern errechnet, dass Rumänien allein zwischen 2000 und 2011 durch Abholzung oder Degradierung über 280 000 Hektar intakte Waldfläche verloren hat – etwa die zehnfache Fläche des Nationalparks Bayerischer Wald.

Die Hälfte der betroffenen Wälder lag innerhalb von Schutzgebieten, und viele Flächen wurden illegal eingeschlagen. [Nach den Recherchen von Agent Green in Rumänien und der Environmental Investigation Agency \(EIA\) mit Sitz in den USA](#) geht ein großer Teil des Holzes an den österreichischen Holzverarbeiter »Holzindustrie Schweighofer«, der seit 2015 auch ein großes Sägewerk im sächsischen Kodersdorf an der Grenze zu Polen betreibt.

Schweighofer beruft sich auf die Legalität der Dokumente und die Zertifizierung seiner Hölzer. Susanne Breitkopf von der EIA kritisiert: »Gefälschte Dokumente sind im rumänischen Forstsektor an der Tagesordnung. Das auf Dokumenten basierende Kontrollsystem der Forstsiegel PEFC und FSC ist da zu schwach. In der Regel finden keine Kontrollen an der Quelle statt, ein glaubwürdiges Zertifikat müsste das Holz aber bis in den Wald zurückverfolgen können.« Filmaufnahmen von Nichtregierungsorganisationen (NGOs) dokumentieren den Raubbau in Rumäniens Urwäldern. Nach Ansicht der NGOs reicht die EU-Holzhandelsverordnung nicht aus, um den illegalen Holzeinschlag innerhalb der Grenzen der Europäischen Union zu bekämpfen.

### **Ist Holz ein klimaneutraler Brennstoff?**

Milde Winter und die Talfahrt des Ölpreises könnten vorerst etwas Druck vom Energieträger Holz nehmen – insbesondere das Geschäft mit Holzpellets leidet darunter. [So hat Deutschlands größter Pellethersteller German Pellets, noch vor Kurzem auf weltweitem Expansionskurs, im Februar Insolvenz beantragt.](#) Mittelfristig werden



## WALD IN DEN KARPATEN

Die Karpaten beherbergen die Hälfte der europäischen Luchs-, Bären- und Wolfsbestände – das Holz der Wälder weckt allerdings Begehrlichkeiten.

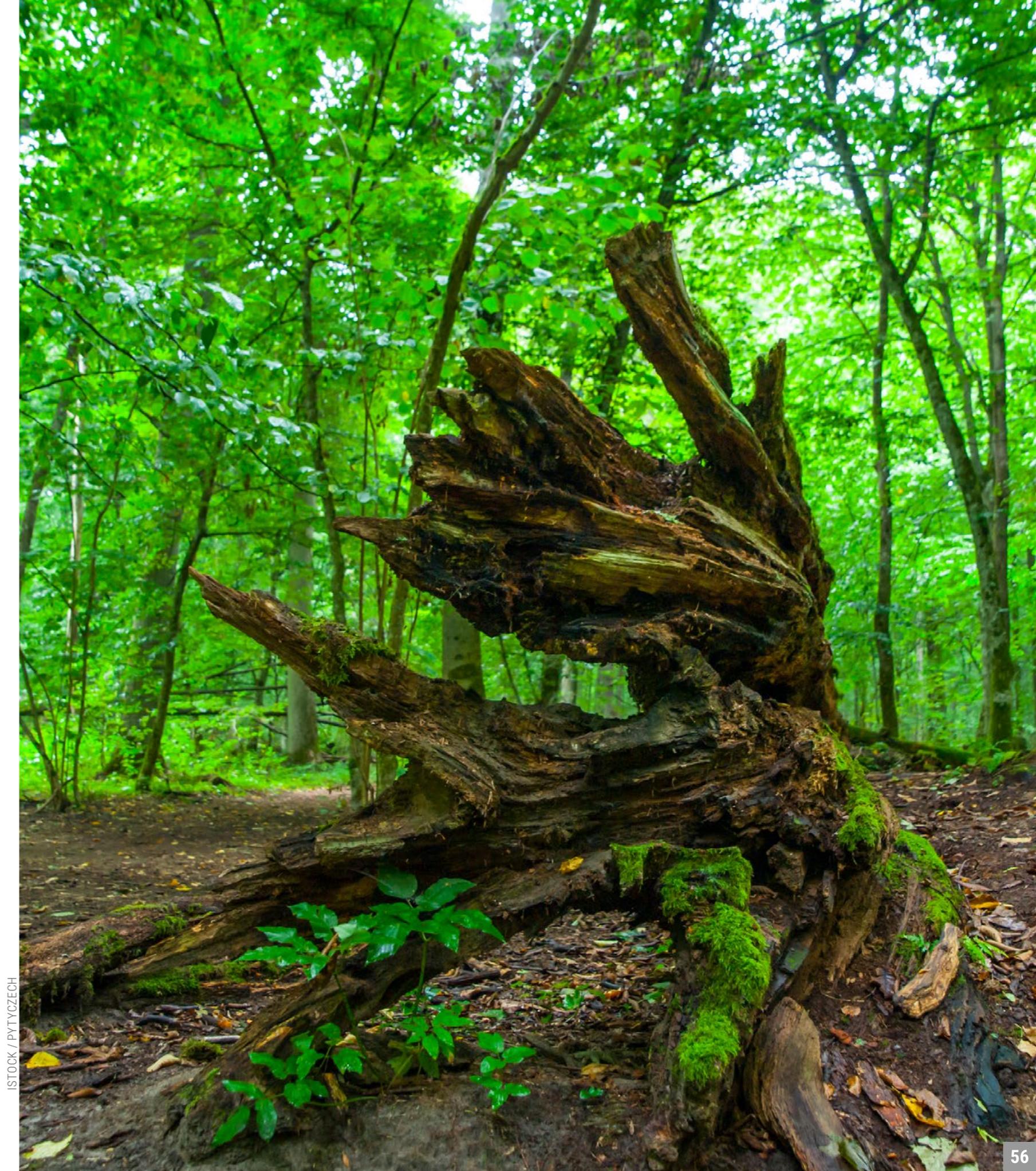
Heizkraftwerke statt wie vorgesehen mit Altholz mit Waldholz betrieben: »All das ist für Außenstehende so undurchsichtig wie ein Dschungel.«

Daniela Thrän vom UFZ in Leipzig sieht bei den gängigen Holzlabels den richtigen Ansatzpunkt: »Man muss sicherstellen, dass die Rohstoffbasis nachhaltig ist. Das geht über Waldzertifizierungen wie PEFC und FSC. Die lassen beide keine Entwaldung zu, aber was das so genannte Restholzsortiment angeht, ist FSC strikter. Das FSC-Siegel verlangt zum Beispiel, dass Reisig und Äste mit geringem Durchmesser im Wald bleiben, was zu weniger Ertrag an Energieholz führt.« Strenge Kriterien bietet auch das Naturland-Siegel für ökologische Waldnutzung, das aber wenig verbreitet ist. In Deutschland sind bislang nur knapp 0,5 Prozent der Waldfläche nach Naturland zertifiziert. Für den Verbraucher sollte klarer werden, aus welcher Art von Forstwirtschaft das Holz kommt. Thrän hält eine verpflichtende Herkunftsangabe für sinnvoll. Die Schweiz ist da einen Schritt voraus und hat das Herkunftszeichen Schweizer Holz (HSH) als Ursprungsbezeichnung geschaffen. Das garantiert die eindeutige Kennzeichnung einheimischer Holzpro-

die Klimaschutzbemühungen und die Einstufung von Holz als klimaneutraler Brennstoff die Nachfrage aber wohl weiter befeuern.

Wie klimafreundlich Brennholz letztlich ist, hat die Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF) zusammen mit der Holzforschung an der Technischen Universität München in bayerischen Forsten untersucht. Daniel Klein von der LWF-Abteilung Boden und Klima erläutert die im Fachmagazin »Science of the Total Environment« veröffentlichten Ergebnisse: »Wir kommen zum Schluss, dass Holz nicht pauschal als klimaneutral gelten kann, denn natürlich entstehen bei der Ernte und Verarbeitung von Rohholz Treibhausgasemissionen. Sie variieren je nach genutzten Baumarten, Ernteverfahren und Transportentfernungen um den Faktor sieben, aber selbst bei einer intensiven Forstwirtschaft ist Holz in der Klimabilanz im-

**URWALD IM POLNISCHEN BIALOWIEZA**  
**Der letzte große Urwald im europäischen**  
**Urwald wächst an der Grenze zwischen Polen**  
**und Weißrussland. Dennoch werden auch dort**  
**mittlerweile Bäume gefällt.**



ISTOCK / PYTYCZECH

mer noch deutlich besser als jeder fossile Energieträger.« Das liegt daran, dass der Kohlenstoff aus dem Holz sich im gegenwärtigen natürlichen Kreislauf zwischen Atmosphäre und Pflanzen befindet, während der Kohlenstoff aus Kohle, Gas und Öl aus Langzeitspeichern stammt. Klein und Kollegen empfehlen als Konsequenz aus ihrer Studie die Integration von Klimabilanzen in die Holzzertifizierung, denn sie seien ein guter Indikator für die Nachhaltigkeit der Bewirtschaftung.

### Grenzen des Wachstums

Holz gilt gemeinhin als »erneuerbare Energie« – aber dass es im Unterschied zu Sonne und Wind keine unbegrenzte Ressource ist, verdeutlicht Forstwissenschaftler Klein anhand des bayerischen Wärmebedarfs: »Selbst wenn Sie die gesamte Holzerntemenge aus bayerischen Wäldern energetisch nutzen würden, könnten Sie damit nur ein Viertel des Wärmebedarfs decken.« [Und das, obwohl im walddreichen Bayern im bundesweiten Vergleich mit Abstand am meisten Holz eingeschlagen wird.](#) Auch deutschlandweit zeigen sich die Grenzen des Wachstums: [Trotz der vergleichsweise intensiven Nutzung wur-](#)

[den im Jahr 2013 gerade einmal 6,3 Prozent der Wärmeenergie in Deutschland aus Holz gewonnen.](#)

Energieholz aus nachhaltiger, regionaler Forstwirtschaft kann also im Vergleich zu fossilen Brennstoffen erhebliche Mengen an Treibhausgasen einsparen. In der Produktionskette vom Baum zum Pellet sind jedoch mehr Transparenz und wirkungsvollere Nachweise sowie Kontrollen nötig, um die Nachhaltigkeit der Produktion zu garantieren. Dazu sind ebenso die Verbraucher gefordert, etwa verstärkt auf die Herkunft des Holzes zu achten und entsprechende Angaben einzufordern. Der Wald allein wird unseren Energiehunger nicht stillen können. Deswegen verweist Rainer Luick auf eine andere Lösung zum Schutz der Wälder: »Wenn wir die Energiewende naturverträglich realisieren wollen, kommen wir nicht umhin, mehr Energie zu sparen.« ↩

Anm. d. Red.: Im Artikel stand ursprünglich, dass Buchenwälder für Holzpellets gerodet werden. Das ist nicht ganz korrekt: Sie werden für Holzhackschnitzel verwendet und damit auf andere Weise energetisch genutzt.

(Spektrum.de, 15. März 2016)

Spektrum  
DER WISSENSCHAFT

KOMPAKT



FÜR NUR  
€ 4,99

# ACHTSAMKEIT UND EMPATHIE

Die Wissenschaft der Wertschätzung

Mindfulness | Der Wert des Augenblicks  
Mitgefühl | Stress hemmt Sinne für andere  
Meditation | Drei Wege ins Nirwana

HIER DOWNLOADEN



WÄLDER

# Klimaschutz – leicht gemacht

von Daniel Lingenhöhl

Die Erderwärmung zumindest zu bremsen, könnte sehr einfach sein – wenn die Menschheit ihre Tropenwälder nur konsequent schützen würde, meint Daniel Lingenhöhl. Warum versagt sie hier eklatant?

**S**eit Montag verhandeln wieder Delegierte aus aller Welt in Paris auf dem [Weltklimagipfel COP21](#) über ein hehres Ziel: Sie wollen die Erde vor einem aus dem Ruder laufenden Klimawandel bewahren und dazu alle Nationen in einem Abkommen vereinen. Im Mittelpunkt steht das Kohlendioxid, das wir Menschen im Übermaß produzieren. Am Rande debattieren die Vertreterinnen und Vertreter der Staatengemeinschaft aber auch noch über ein Regelwerk, das für den Planeten vielleicht noch wichtiger ist – und das für uns vielleicht schon die halbe Miete wäre, um die Erderwärmung zumindest einzudämmen: den globalen Schutz der Wälder, vor allem der tropischen Regenwälder. Die riesigen noch baumbestandenen Gebiete in Amazonien, dem Kongobecken oder Neuguinea agieren gegenwärtig als gewaltige Kohlenstoffsinken, weil ihre Vegetation das Kohlendioxid aufnimmt und als Holz oder in Torfböden speichert.

Ihr konsequenter Schutz könnte zusammen mit gezielter natürlicher Wiederbewaldung degradierter Rodungsflächen die Erderwärmung bremsen. Darauf weist zu-

mindest eine Studie von Richard A. Houghton und Alexander Nassikas vom Woods Hole Research Center sowie Brett Byers vom Rainforest Trust hin, [die gerade in »Nature Climate Change« erschien](#). Sie erwarten, dass es uns nicht gelingen wird, die Emissionen aus verbrannten fossilen Energieträgern im nächsten Jahrzehnt überhaupt und bis 2050 sogar um 80 Prozent zu verringern. Und damit würden wir auch das angepeilte so genannte [Zwei-Grad-Ziel](#) verpassen – das errechnete Ausmaß an Erwärmung, das unsere Gesellschaft womöglich gerade noch verkraftet.

So weit, so berechtigt pessimistisch. Denn schon vergangene Klimakonferenzen scheiterten daran, verbindliche Obergrenzen für den CO<sub>2</sub>-Ausstoß festzulegen und dabei politische und emissionsstarke Schwergewichte wie die USA, China oder Indien einzubinden. Selbst viele Staaten wie Kanada oder Japan, die ursprünglich das Kyoto-Protokoll ratifiziert hatten und ihre Emissionen eindämmen sollten, scheiterten daran und zogen sich deshalb teilweise völlig daraus zurück. Die Welt verschleudert also fröhlich weiter Erdöl und Kohle, und die Emissionen verharren auf

hohem Niveau, [selbst wenn sie in manchen Jahren wie etwa 2014 zumindest nicht noch weiter steigen](#).

Deshalb betonen die Wissenschaftler den großen Wert der tropischen Regenwälder, die nebenbei auch einen gewaltigen Anteil der globalen Artenvielfalt beheimaten: Würde die Weltgemeinschaft endlich den Kahlschlag dieses Ökosystems beenden, durch Holzfäller beeinträchtigte Wälder sich erholen lassen und entwaldete, aber nicht genutzte Gebiete mit einheimischen Bäumen wieder aufforsten, könnten langfristig drei bis vier Milliarden Tonnen Kohlendioxid pro Jahr der Atmosphäre zusätzlich entzogen werden. Dagegen rechnen die Autoren damit, dass sich unter den heutigen Bedingungen bis 2050 jährlich durchschnittlich mehr als sieben Milliarden Tonnen CO<sub>2</sub> zusätzlich in der Atmosphäre anreichern würden. Das Klimasystem würde also nur halb so stark belastet, die Aufheizung damit eingedämmt werden.

### **Schwieriges Interessengemenge**

Doch statt die Regenwälder endlich konsequent zu schützen, passiert das Gegenteil: [In Brasilien nahm die Abholzung im letz-](#)

ten Jahr wieder um 16 Prozent zu (wenn gleich die gerodete Fläche von rund 5400 Quadratkilometern verglichen mit der Zeit um die Jahrtausendwende immer noch relativ klein ist), **Indonesien wurde von den schlimmsten Wald- und Buschbränden der letzten Jahre heimgesucht** und **selbst aus Neuguinea wurde eine heftige Feuersaison gemeldet**, obwohl die Insel bislang als letztes Refugium der Regenwälder im indopazifischen Raum galt.

In vielen Fällen stecken hinter den Abholzungen und Rodungen jedoch keine armen Kleinbauern, die verzweifelt Land gewinnen wollen, um ihre Familien zu ernähren. Das galt früher, in den 1970er und 1980er Jahren, als Umsiedlungsprogramme in Brasilien und Indonesien gezielt versuchten, den Regenwald für Bevölkerungsschichten zu erschließen, die aus überbevölkerten Landesteilen abwandern sollten. Heute treiben dagegen oft nationale und internationale Agrarriesen, Bergbauunternehmen oder staatliche Infrastrukturprogramme die Entwaldung voran: Auf riesigen Flächen holzen sie den Wald ab, um beispielsweise Sojabohnen, **Ölpalmen** oder Akazien anzupflanzen – das Geld für diese Arbeiten holen sie dabei oft mit dem Verkauf einge-

schlagener Edelhölzer wieder herein. Brasilien treibt die Erschließung Amazoniens mit weiteren Staudämmen und Straßen voran, selbst wenn diese ökologisch und ökonomisch unverantwortlich sind, wie das Beispiel Belo Monte am Rio Xingu zeigt. Der südamerikanische Wald- und Wirtschaftsriese debattiert zudem darüber, Gesetze zum Waldschutz zu lockern und Naturschutzgebiete oder Indianerreservate für die Nutzung freizugeben, wenn sich darin Rohstoffe verbergen oder diese der »Landesentwicklung« im Weg stehen. Die bisherigen Erfolge würden damit konterkariert.

### **Gibt es eine Lösung?**

Diese Probleme schätzen auch Houghton, Nassikas und Byers sehr hoch ein – in Indonesien setzen sich viele Unternehmen wiederholt über Recht und Gesetz hinweg, um Regenwälder für Nutzland zu zerstören. Befürchten müssen sie anschließend nur selten etwas, da ihr politischer und wirtschaftlicher Einfluss zu gering und die Zivilgesellschaft noch zu schwach ist. Ähnliche Zustände herrschen in Peru, das ebenfalls noch ausgedehnte Wälder besitzt, **wo aber Naturschützer um ihr Leben fürchten**

**müssen, wenn sie sich bestimmten Interessen widersetzen.**

Und umdenken müssen auch die Konsumenten in den Industriestaaten, die nicht nur zu den wichtigsten Kohlendioxidproduzenten gehören, sondern ebenso zu den bedeutendsten Abnehmern von Gold, Holz, Soja, Fleisch oder Palmöl aus dem Raubbau zählen. Die Mitgliedsländer der Europäischen Union etwa führen 25 Prozent des Sojas, 18 Prozent des Palmöls, 15 Prozent des Rindfleisches und 31 Prozent des Leders ein, die weltweit aus widerrechtlich zerstörten Regenwäldern stammen. Die EU ist damit global gesehen der größte und wichtigste Akteur im Handel mit Konsumgütern, für die wertvolle Naturflächen am Gesetz vorbei zerstört wurden. Dominiert wird der Handel von fünf Nationen: Italien, Deutschland, Frankreich, Großbritannien und den Niederlanden, über deren Häfen ein Großteil der Einfuhren erfolgt. Sie verbrauchen fast zwei Drittel dieser Güter, wobei die Schwerpunkte von Staat zu Staat unterschiedlich sind. Gleichzeitig fühlen sich Staaten wie die Bundesrepublik als Vorreiter im Klimaschutz.

Dabei gibt es Instrumente, mit denen es lukrativer wird, Wälder zu schützen, statt

sie zu zerstören. Und eines davon wird auch in Paris wieder verhandelt: **REDD+** (Reduced Emissions from Deforestation and forest Degradation) soll die Emissionen aus der Abholzung reduzieren helfen, indem – verkürzt gesagt – waldreiche Nationen Kompensationen erhalten, wenn sie ihre Ökosysteme bewahren, statt sie für kurzfristige Interessen zu opfern. Bei den Vorverhandlungen in Bonn konnten sich die Delegierten immerhin schon mal auf ein Regelwerk einigen, wie Wälder und Aufforstung die CO<sub>2</sub>-Bilanzen verbessern können. Ob in Paris schließlich ein endgültiger Durchbruch erzielt werden kann, bleibt abzuwarten. Eines sollte den Abgeordneten jedoch klar sein: Billiger lässt sich das Klima nicht schützen als mit Hilfe der Bäume in den Tropen. ↩

(Spektrum.de, 2. Dezember 2015)



**Spektrum**  
DER WISSENSCHAFT

# KOMPAKT

FÜR NUR  
€ 4,99

# LANDWIRTSCHAFT

Von **Bodenschutz** bis **Urban Gardening**

**Biokohle:** Ein neues altes Wundermittel?  
**Klimawandel:** Die Landwirtschaft wetterfest machen

HIER DOWNLOADEN

ISTOCK / AVALON-STUDIO



ENERGIEPOLITIK

# KOHLE

## MUSS VIEL TEURER WERDEN

von Ottmar Edenhofer

Kohle erlebt eine Renaissance – dank enorm hoher Subventionen. Das schadet dem Klima und den Menschen, kommentiert Ottmar Edenhofer vom Berliner Mercator Research Institute on Global Commons and Climate Change. Denn das Geld ließe sich besser nutzen.

(Anm. d. Red.: Der Artikel entstand vor der Weltklimakonferenz in Paris im Dezember 2015, auf die Bezug genommen wird.)

**W**eniger als drei Monate vor Beginn der Weltklimakonferenz in Paris hatten Dutzende Staaten ihre nationalen Klimaschutzziele vorgelegt – darunter auch China und die USA. So manch einer wähnt bereits eine Wende für den weltweiten Klimaschutz zum Greifen nahe. Doch bislang sieht es nicht so aus, als ob das, was jetzt an Zugeständnissen der Staaten auf dem Tisch liegt, ausreichen würde, um die Erwärmung der globalen Mitteltemperatur auf nicht mehr als zwei Grad Celsius zu begrenzen.

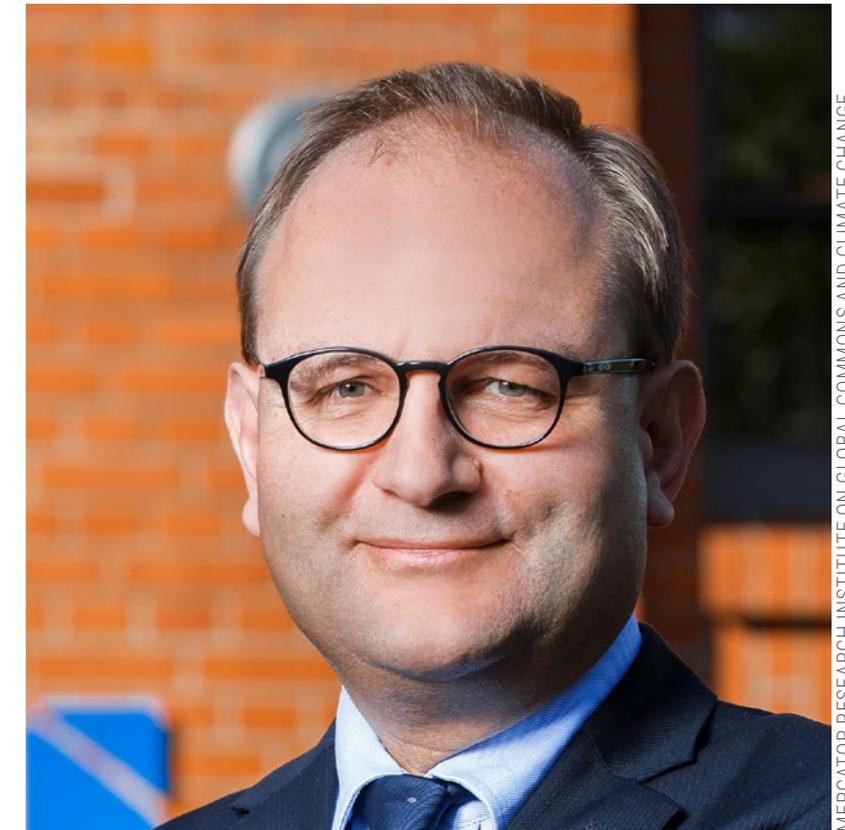
Denn selbst wenn der politische Wille zum Klimaschutz in den kommenden Wochen noch deutlicher artikuliert wird – die Fakten sprechen derzeit leider eine andere Sprache: Wir erleben eine Renaissance der Kohle. Vor allem arme, aber schnell wachsende Entwicklungsländer investieren gerade massiv in den Bau neuer Kohlekraftwerke. Sie begeben sich damit auf eine Pfadabhängigkeit, die dem Weltklima noch über Jahrzehnte schwer zu schaffen machen wird. Konkret heißt das: Wenn nur ein Drittel der weltweiten Planungen von Kohlekraftwerken Realität wird, wäre das glo-

bale Kohlenstoffbudget zum Erreichen des Zwei-Grad-Ziels bereits nahezu aufgebraucht.

Denn insgesamt kann die Atmosphäre nur zirka 1000 Gigatonnen CO<sub>2</sub> aufnehmen, wenn wir das Zwei-Grad-Ziel mit hoher Wahrscheinlichkeit erreichen wollen. Es lagern dagegen noch rund 15 000 Gigatonnen an CO<sub>2</sub> in Form von fossilen Brennstoffen in der Erde. Mindestens 40 Prozent des Öls, 40 Prozent des Gases und vor allem 80 Prozent der andernfalls genutzten Kohle müssen also im Boden bleiben.

Danach sieht es momentan allerdings nicht aus – denn Kohle ist weltweit als Energielieferant spottbillig. Es gibt große Vorkommen, und der Kohlepreis ist relativ zu Erdgas oder erneuerbaren Energien sehr niedrig. Und vor allem: Weltweit subventionieren die Staaten den Einsatz von Öl, Gas und Kohle mit 150 US-Dollar je Tonne CO<sub>2</sub>, wenn man alle sozialen Kosten – beispielsweise Gesundheitsschäden – mit einrechnet.

Einer der wichtigsten Hebel für die internationale Klimapolitik ist daher die CO<sub>2</sub>-Bepreisung. Energie aus Kohle, Öl und Gas muss wesentlich teurer werden. In einem ersten Schritt wäre schon viel gewonnen,



#### **OTTMAR EDENHOFER**

**Prof. Dr. Ottmar Edenhofer ist Direktor des Mercator Research Institute on Global Commons and Climate Change (MCC) sowie Chefökonom am Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK) und Lehrstuhlinhaber für die Ökonomie des Klimawandels an der Technischen Universität Berlin.**

wenn zumindest die hohen Kohlesubventionen abgebaut würden. Am Mercator Research Institute on Global Commons and Climate Change (MCC) [konnten wir zeigen](#),

---

»Weltweit subventionieren die Staaten Öl, Gas und Kohle mit 150 US-Dollar je Tonne CO<sub>2</sub> – wenn man alle sozialen Kosten mit einrechnet.«

---

dass das allein schon ausreichen würde, um in den nächsten 15 Jahren in 70 Staaten der Welt den Menschen universellen Zugang zu Trinkwasser, in 60 zu funktionierenden Sanitäreinrichtungen und in 50 zu Elektrizität zu ermöglichen. Wenn die Kohlesubventionen stattdessen in den Aufbau dieser Infrastrukturen gesteckt würden, wäre das ein hervorragendes Programm zur Armutsbekämpfung.

Auch die Industriestaaten würden von einer CO<sub>2</sub>-Bepreisung profitieren. Hier sind es vor allem die Finanzminister, die ein Interesse daran haben müssten – selbst wenn sich ihr Herz sonst nicht für die Klimapolitik erwärmt. Schließlich ist die CO<sub>2</sub>-Bepreisung eine äußerst effiziente Quelle zur Finanzierung von Staatshaushalten, ähnlich wie die Öko-Steuer zur Senkung der Lohnnebenkosten eingesetzt wird. Durch sie ließen sich beispielsweise Mittel für eine bessere Gesundheitsversorgung, die Stärkung des Bildungssektors oder die Verbesserung des öffentlichen Verkehrssystems bereitstellen. Wenn die Einnahmen in solche wirtschaftsfördernde Infrastrukturen fließen würden, könnten Unternehmen in solchen Ländern sogar langfristige Standortvorteile erwachsen.

Auf dem Weg zu einer globalen CO<sub>2</sub>-Bepreisung gilt es, zunächst zwei wesentliche Hürden zu nehmen. Erstens wäre es ein gutes politisches Signal, wenn über den [Green Climate Fund](#) Entwicklungsländer dafür bezahlt würden, dass sie einen weltweiten CO<sub>2</sub>-Preis akzeptieren. Mit diesem Geld könnten sie in die Technologieentwicklung und in ihre Wettbewerbsfähigkeit investieren. Zweitens wäre es wichtig, dass die Europäische Union mit gutem Beispiel vorangeht und das Europäische Emissionshandelssystem ETS reformiert. Hier brauchen wir vor allem einen stetig steigenden Mindestpreis. Auch eine sektorale Erweiterung des ETS auf den Transport- und Gebäudesektor könnte helfen, das System wieder flott zu machen.

Um langfristig zu einem globalen Klimaregime mit ambitionierten Stabilisierungszielen zu gelangen, sollten einzelne Staatengruppen mit einer CO<sub>2</sub>-Bepreisung als Vorreiter aktiv werden. Denn der Nutzen von Klimapolitik offenbart sich erst sehr spät. Wer jetzt aber Kohle teurer macht, der kann davon schon relativ schnell profitieren. ↩

(Spektrum.de, 17. September 2015)



KLIMAPOLITIK

# BEGRABT DAS ZWEI-GRAD-ZIEL

von David G. Victor und Charles F. Kennel

Wie steht es um die Erde?  
Die globalen Durchschnittstemperaturen sagen darüber eigentlich nichts aus, meinen David Victor, Professor für Internationale Beziehungen an der University of California in San Diego und Charles Kennel, emeritierter Direktor der Scripps Institution of Oceanography in San Diego. Stattdessen sollten wir eine ganze Reihe anderer Vitalparameter erfassen.

Seit ungefähr einem Jahrzehnt konzentriert sich die Weltdiplomatie im Kampf gegen den Klimawandel auf das **Zwei-Grad-Ziel**: Die Erderwärmung soll die weltweite Durchschnittstemperatur verglichen mit der Zeit vor der Industrialisierung nur um maximal zwei Grad Celsius erhöhen. Dieses Ziel – mutig und eingängig – wurde unkritisch akzeptiert und hat sich als einflussreich herausgestellt.

Der Beitrag zur Verringerung der Emissionen im **fünften Sachstandsbericht** des Weltklimarats **IPCC** dreht sich um dieses Ziel – so wie fast jeder politische Plan, in dem es darum geht, den Kohlendioxidausstoß zu reduzieren: von Kalifornien bis zur Europäischen Union.

Diese dreiste Vereinfachung muss nun mit der Realität konfrontiert werden. Politisch und wissenschaftlich führt das Zwei-Grad-Ziel in die falsche Richtung. Politisch erlaubte es einigen Regierungen die Behauptung, sie würden ernsthafte Maßnahmen ergreifen, um die Erderwärmung einzudämmen, obwohl sie in Wahrheit nichts

erreicht hatten. Und wissenschaftlich gesehen existieren bessere Messmethoden, mit der man die menschliche Belastung des Klimas erfassen kann, als steigende Durchschnittstemperaturen – die sich seit 1998 kaum nach oben bewegt haben und nur schwach mit den Dingen verbunden sind, die Regierungen oder Unternehmen direkt kontrollieren können.

Wenn wir aber dabei versagen, wissenschaftlich gehaltvolle Ziele festzulegen, erschweren wir Wissenschaftlern und Politikern zu vermitteln, welche großen Klimaschutzinvestitionen handfeste Resultate bringen. Einige Gegenreaktionen von sogenannten Klimaskeptikern hängt teilweise mit der Besessenheit mancher Entscheidungsträger zusammen: Sie fokussieren sich völlig auf die globalen Temperaturen, die aber in Wahrheit nicht mit den wirklichen Gefahren des Klimawandels im Gleichschritt marschieren.

Wir benötigen also neue Ziele. Es ist an der Zeit, endlich eine große Zahl verschiedener »Lebenszeichen« der Erde zu erfassen und zu verfolgen, die in unserem

wissenschaftlichen Verständnis der Klimafaktoren und -risiken besser verwurzelt sind – etwa wie sich die Wärmekapazität der Ozeane verändert. Zudem benötigen wir jeweils verbindliche Ziele und politische Maßnahmen für alle Gase, die durch uns Menschen emittiert werden, um sie zu verringern.

### **Ein eigenes Ziel**

Seit Anfang an gestaltet es sich schwierig, einklagbare Ziele beim Klimaschutz zu formulieren. Die 1992 von den Vereinten Nationen verfasste **Klimarahmenkonvention** will als Ziel »gefährliche menschliche Umwälzungen des Klimasystems« verhindern. Versuche, die Bedeutung von »gefährlich« näher zu definieren, haben sich als unergiebig erwiesen: Je nachdem welchen Teil des Klimasystems man genauer betrachtet, unterschieden sich auch die Antworten, was als gefährlich erachtet wird. Und dazu kommen noch unterschiedliche nationale Perspektiven.

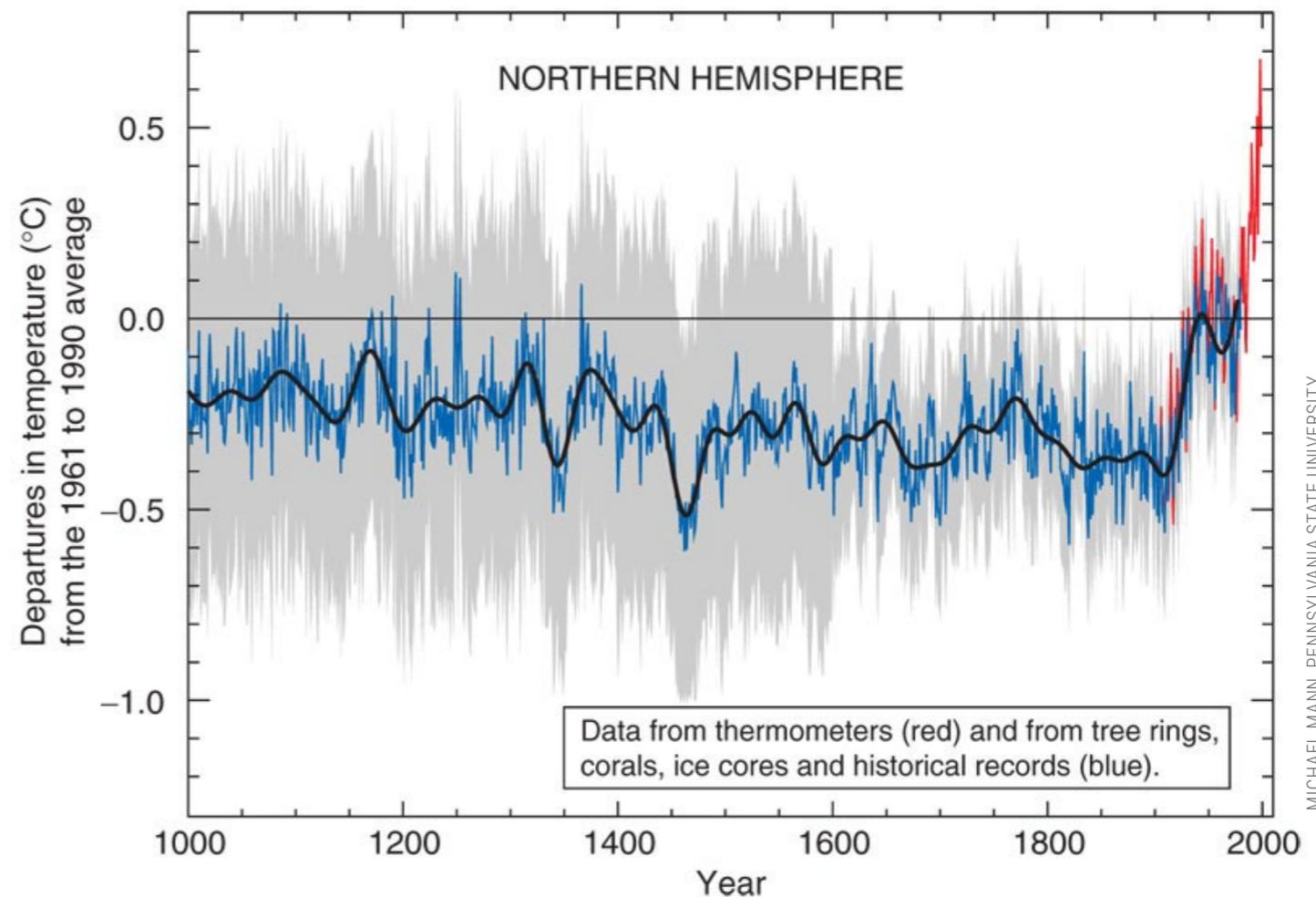
Die Klimakonferenzen 2009 und 2010 in Kopenhagen und Cancun packten dieses

politische Ziel in etwas konkretere Sätze: die globale Durchschnittstemperatur. Das Zwei-Grad-Ziel stand wissenschaftlich auf tönernen Füßen, aber es bot einen einfachen Fokus und war aus früheren Diskussionen geläufig, etwa im IPCC, der EU oder der G8 der Industriestaaten. Damals klang das Zwei-Grad-Ziel mutig und machbar.

Seitdem sind zwei diese politische Probleme aufgetaucht. Zum einen ist das Ziel praktisch nicht zu erreichen. Angesichts des permanenten Versagens, die Emissionen weltweit zu verringern, wird der Treibhausgasausstoß sicherlich die Grenze nach oben einreißen. Es wäre laut vieler Klimamodelle nur machbar, wenn weltweit scharfe Einschnitte bei den Emissionen stattfänden. Die Simulationen gehen allerdings von heroischen Annahmen aus, etwa einer sofortigen globalen Zusammenarbeit und weiter Verbreitung von Technologien wie dem Einfangen und Einlagern von Kohlendioxid aus Kraftwerken, genannt Carbon Capture and Storage (CCS). Momentan wird damit nicht einmal in großem Maßstab experimentiert. Da das Zwei-Grad-Ziel knackig klingt und zukünftige Erwärmung betrifft, können Politiker Tatkraft vorgeben, obwohl sie in Wahrheit wenig

## Hockeyschlägerkurve

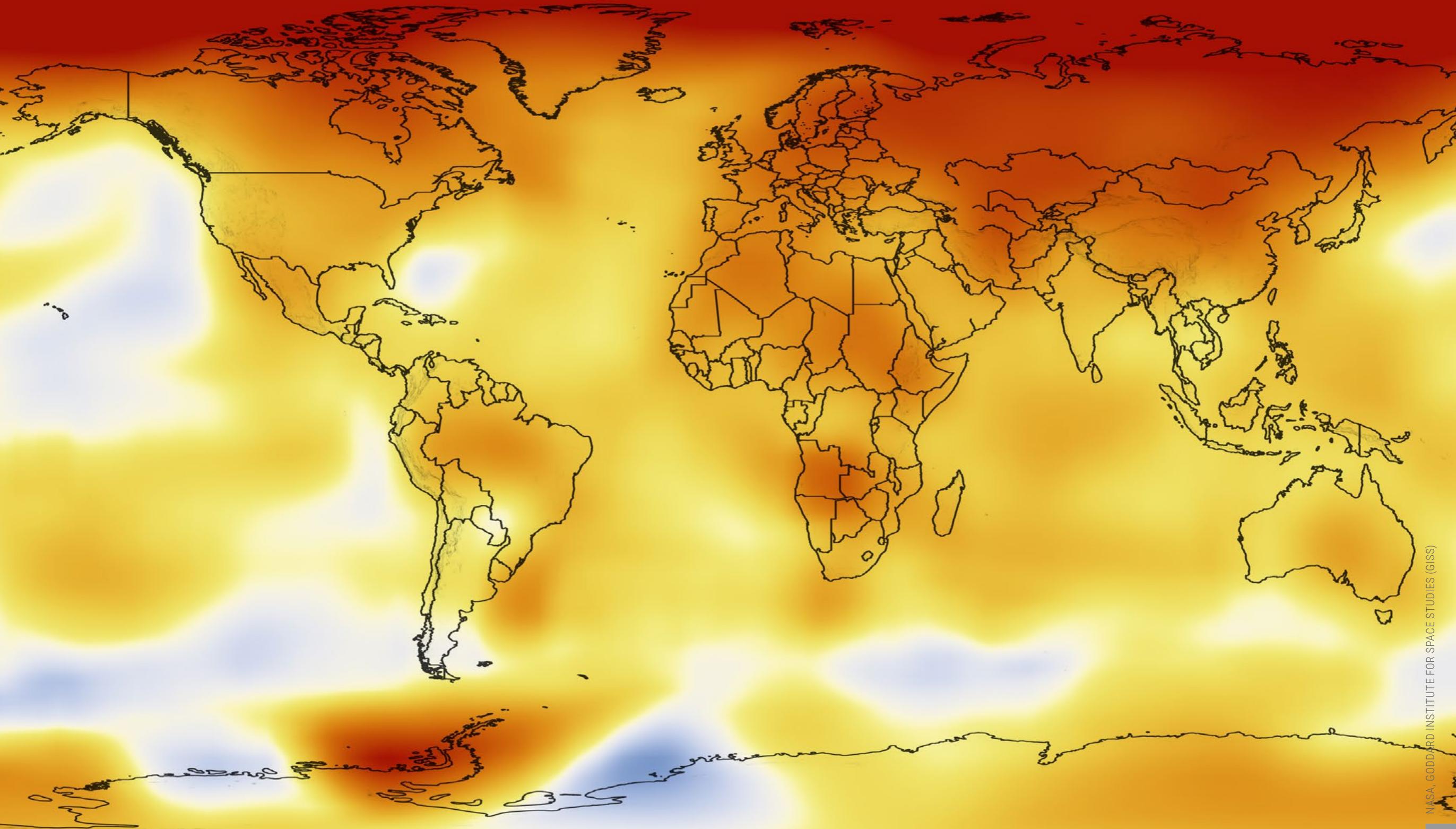
An dieser Grafik scheiden sich die Geister: Vielen Klimaforschern gilt sie als Beleg für die starke Erderwärmung der letzten Jahrzehnte. Das so genannte Hockeyschläger-Diagramm stammt aus einer 1999 veröffentlichten wissenschaftlichen Untersuchung von Michael Mann von der Pennsylvania State University. Die Grafik zeigt die rekonstruierte und seit dem 19. Jahrhundert gemessene Entwicklung der globalen Durchschnittstemperatur während der letzten 1000 Jahre: Unverkennbar ist die starke Erwärmung seit dem Zweiten Weltkrieg. Kritiker monieren, dass die Kurve auf Grund von statistischen und rechnerischen Fehlern ein Artefakt sei. Zahlreiche weitere Rekonstruktionen, die die vorherigen Kritikpunkte berücksichtigen, zeigen jedoch den gleichen Trend.



MICHAEL MANN, PENNSYLVANIA STATE UNIVERSITY

## ERDERWÄRMUNG

Abweichungen der Durchschnittstemperaturen der Jahre 2005 bis 2009 verglichen mit der Zeit von 1951 bis 1980: Gelbe und rote Töne geben höhere, blaue Farben hingegen kühlere Werte wieder. Im globalen Rahmen zeichnet sich eine deutliche Erwärmung ab, die in der Arktis besonders ausgeprägt ausfiel.



unternehmen. Sie jagen diesem unerreichbaren Ziel nach und ignorieren darüber, dass wir uns massiv an den Klimawandel anpassen müssen.

Zum zweiten ist der Weg zum Ziel nicht zu verwirklichen. Die Zwei-Grad-Grenze hängt nur probabilistisch mit Emissionen und Gegenmaßnahmen zusammen. Es schreibt bestimmten Regierungen und Personen nicht vor, was sie konkret zu tun haben. Dabei war die internationale Politik immer dann am erfolgreichsten, wenn ihre Ziele mit exakten Handlungsanweisungen verbunden waren. Die acht Millenniumsziele der Vereinten Nationen, die im Jahr 2000 ausgegeben wurden, wurden dann wirksamer in Angriff genommen, als man sie in 21 Ziele und 60 detaillierte Indikatoren aufspaltete: Sie waren messbar, praktisch und verknüpft mit dem, was Regierungen, Nichtregierungs- und Hilfsorganisationen tun konnten.

### **Verstörende Pause**

Die wissenschaftlichen Grundlagen für das Zwei-Grad-Ziel sind dünn. Die Mitteltemperatur der Erde stieg in den vergangenen Jahren kaum. Doch andere Messungen belegen, dass sich der **Strahlungsantrieb** be-

schleunigt – also das Ausmaß, mit dem die sich in der Atmosphäre ansammelnden Treibhausgase die Energiebilanz der Erde stören. Die Arktis beispielsweise heizt sich ungebremst auf. Das Klima in den höheren Breiten reagiert empfindlicher als unser Planet im Ganzen. Und über Rückkopplungsmechanismen könnte dies zu extremen Wetterlagen in den mittleren Breiten führen.

Warum könnte der menschliche Klimaeinfluss stärker wachsen, wenn gleichzeitig der Temperaturanstieg weit gehend ausfällt? Die Antwort liegt mit fast 100-prozentiger Sicherheit in den Ozeanen: Sie nehmen 93 Prozent der zusätzlichen Wärmeenergie auf, die dem Klimasystem zugeführt wird – wodurch unter anderem der Meeresspiegel steigt. Ein einziger Index des Klimawandelrisikos wäre wunderbar, doch Derartiges ist nicht möglich. Wir benötigen eine ganze Reihe an Indizes um die verschiedenen Klimaprobleme und ihre Folgen zu erfassen. Mediziner nennen ihre Sammlung an Gesundheitsindikatoren Lebenszeichen. Den gleichen Ansatz benötigen wir für das Klima.

Den besten Gradmesser verwenden wir sogar schon geraume Zeit: die Konzentration

---

»Die wissenschaftlichen Grundlagen für das Zwei-Grad-Ziel sind dünn«

---

von Kohlendioxid und anderer Treibhausgase in der Atmosphäre (beziehungsweise den veränderten Strahlungsantrieb, den diese Gase verursachen). Derartige Parameter werden bereits exakt von einem internationalen Netzwerk an Überwachungsstationen gemessen. Einem globalen Ziel für die durchschnittlichen Treibhausgaskonzentrationen in der Atmosphäre im Jahr 2030 und 2050 müsste also zugestimmt werden. Danach kann man dies in spezifische Emissionsziele umwandeln und die entsprechenden politischen Handlungen festlegen. Diese müssen in regel-

mäßigen Abständen überprüft werden, damit die einzelnen Regierungen eindeutig sehen, wie ihre Maßnahmen zum globalen Ergebnis beitragen.

Manche Faktoren wie Methan oder Ruß unterscheiden sich lokal oder regional beträchtlich. Zudem existieren noch einige wissenschaftliche Unsicherheiten bezüglich des Zusammenhang zwischen unseren Emissionen und den gemessenen Konzentrationen. Momentan gewinnen allerdings einige politische Initiativen an Fahrt, mit denen der Nachweis und die Kontrolle dieser Erwärmungsfaktoren verbessert werden sollen. Die [Climate and Clean Air Coalition](#) etwa besteht aus einer Gruppe von Staaten, die sich darauf konzentrieren, die Freisetzung kurzlebiger Treibhausgase zu verringern.

Entscheidungsträger sollten zudem die Wärmekapazität des Ozeans und die Temperaturen an den Polen überwachen. Da die in der Tiefsee gespeicherte Wärmeenergie in den nächsten Jahrzehnten und Jahrhunderten wieder freigesetzt wird, ist sie ein guter Proxy für die langfristigen Risiken zukünftiger Generationen und die Ökosysteme der Erde. Die Temperaturen in den hohen Breiten muss man sinnvoller-

weise ebenfalls in die planetaren Lebenszeichen einfügen, da sie so empfindlich auf Klimaveränderungen reagieren und viele konkrete Schäden nach sich ziehen.

### **Den Weg beschreiten**

Was wir letztendlich noch benötigen, ist eine Art Schwankungsindex, der die sich entwickelnden Risiken extremer Ereignisse misst – so dass wir die globalen Lebenszeichen mit lokalen Informationen verknüpfen können, was die Menschen am meisten interessiert. Am besten fängt man dabei mit dem gesamten Gebiet an, in dem festgelegte Parameter in ihren Werten das Dreifache der Standardabweichung vom lokalen und jahreszeitlichen Mittelwert überschreiten.

Das Fenster für Veränderungen und verbesserte Zielvorgaben ist offen. Wenn man dem Klimawandel ernsthaft begegnen möchte, muss man über die Kosten der Emissionsziele streiten, die Lasten teilen und internationale Finanzierungsmechanismen entwickeln. Aber die Diplomaten müssen endlich von ihrem Zwei-Grad-Ziel abrücken. Wissenschaftler müssen ihnen erklären helfen, warum das nötig ist und durch was es ersetzt werden sollte.

Neue Indikatoren werden bis zum Pariser Gipfel nicht fertig sein, aber der Weg dahin sollte dann verabschiedet werden. Ein eindeutiges internationales Mandat würde die Erforschung derartiger Lebenszeichen der Erde ankurbeln – so wie der Millenniumsgipfel der Vereinten Nationen dies für die Millenniumsziele geleistet hat. Die Pariser Übereinkunft sollte eine internationale technische Konferenz verlangen, auf der man diskutiert, wie man die heutigen wissenschaftlichen Messungen in planetare Lebenszeichen von morgen überführen kann.

Die Öffentlichkeit muss verstehen können, was sie bezahlen soll. »Kohlendioxidkonzentration« oder »Wärmekapazität der Ozeane« sind dabei weniger griffig als »Temperatur«, um dem Mann auf der Straße die Gefahren des Klimawandels vorzuführen. Doch Patienten wissen mittlerweile, dass Ärzte viele Parameter wie Blutdruck, Herzschlag oder Gewicht überprüfen müssen, um Krankheiten frühzeitig zu erkennen und sie zu behandeln. Die gleiche Strategie benötigen wir nun auch für die Erde. ↩

(Spektrum.de, 1. Oktober 2014)

FORSCHUNG IN ZAHLEN:

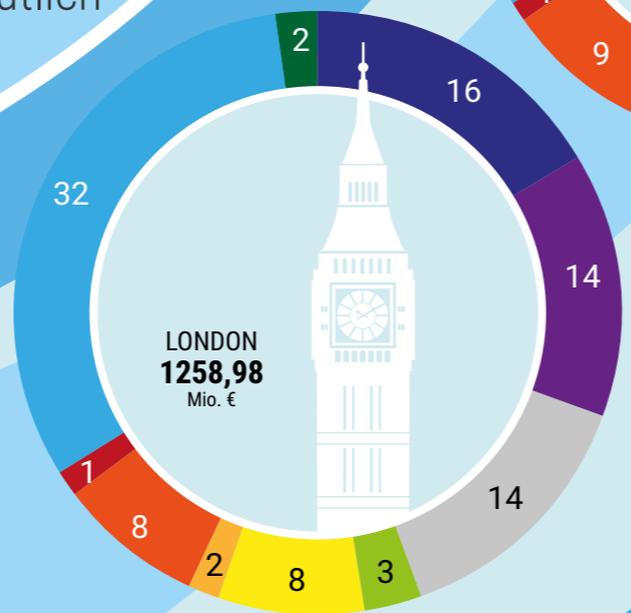
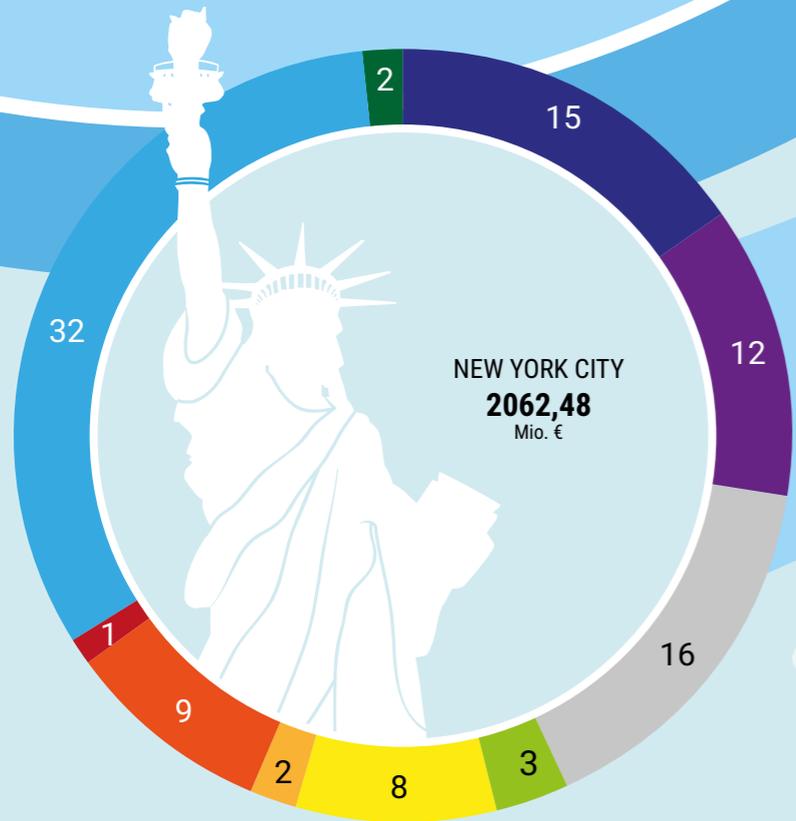
# Klima & Megastädte

Von Mirijam Plappert

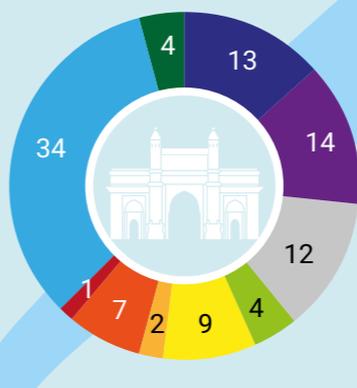
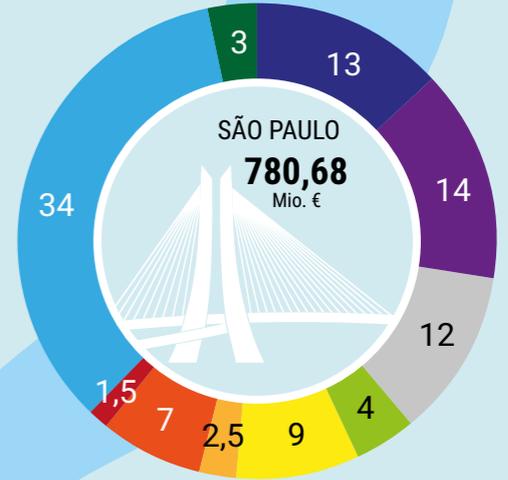
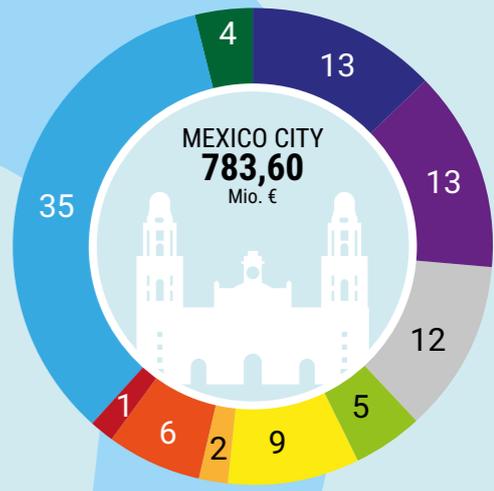
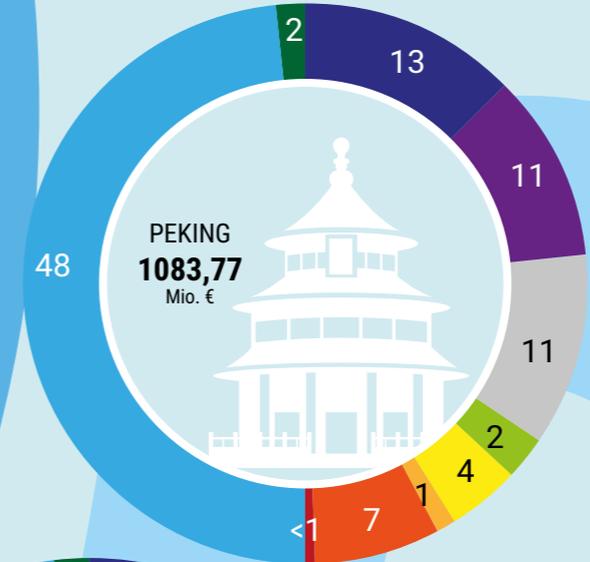
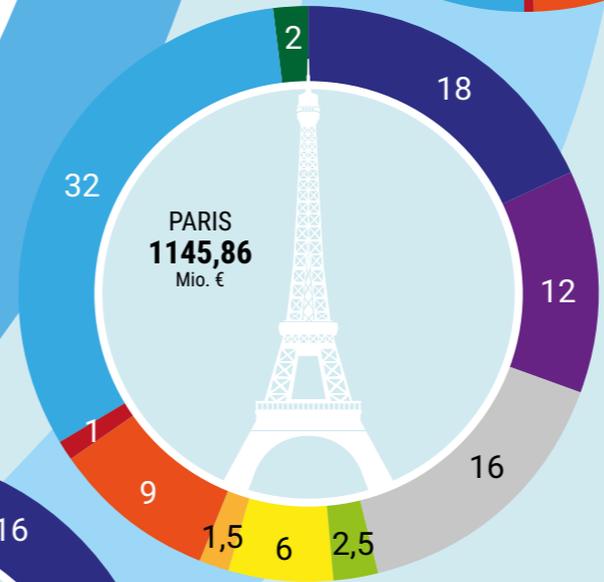
Wie passen sich Megastädte heute schon an den Klima-wandel an und in was investieren sie besonders viel Geld? Forscher um Lucien Georgeson vom University College London fassten in einer aktuellen Studie zusammen, wie viel Geld zehn globale Mega städte in Wirtschaftszweige zur Anpassungen an den Klima wandel und Schutz vor Klimakatastrophen 2014/15 investierten. Weltweit wurden 283 Milliarden Euro dafür ausgegeben. Das entspricht 0,38 Prozent des globalen Bruttoinlandsprodukts. Die Forscher kritisieren, dass in Städten in Entwicklungs-ländern deutlich weniger Geld in Anpassungen investiert wird als in Industrieländern.

€  
Peking gab etwa **0,33%** des Bruttoin-stadtprodukts aus, Addis Abeba zirka **0,14%**.

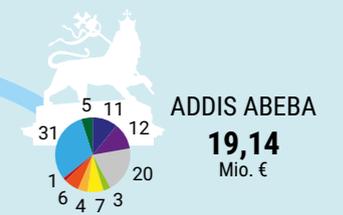
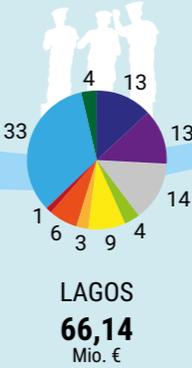
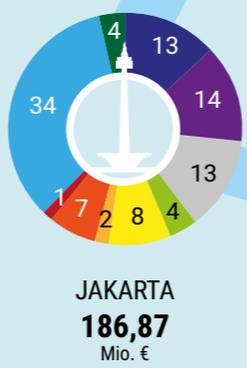
Die Zahlen in den Tortendiagrammen sind Prozentangaben



Londons Ausgaben für den Katastrophenschutz: 0,25 – 27,1 Mio. €



Pro Kopf investierte New York rund 245,6 Mio. €, Addis Abeba etwa 6 Mio. €



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / MIRIAM PLAPPERT, ANKE HEINZELMANN, NACH: GORGESEON, L. ET AL.: ADAPTATION RESPONSES TO CLIMATE CHANGE: DIFFER BETWEEN GLOBAL MEGACITIES. IN: NATURE CLIMATE CHANGE, 10: 1038-1041 (2016); PEKING: FOTOLIA / MUCHMANIA; NEW YORK: PARIS; LONDON: FOTOLIA / BARRAW; MEXICO CITY: FOTOLIA / BHARY; SÃO PAULO: FOTOLIA / LISAKOLBASA; MUMBAI: FOTOLIA / ARTYOM YEFIMOV; JAKARTA: FOTOLIA / WIRAVITWORAPANI; AGOS: ADDIS ABEBA: FOTOLIA / JEFF BIRD





KLIMAPOLITIK

# Hoffnung und heiße Luft

von Christopher Schrader

Ein ambitioniertes Ziel steht im globalen Klimavertrag, der in Paris unterzeichnet wurde: Nicht mehr als anderthalb Grad soll die globale Temperatur steigen. Ist das überhaupt noch möglich?

**S**eit Laurent Fabius seinen **grünen Spielzeughammer** fallen ließ, gibt sich die Welt einem Traum hin. »L'accord de Paris pour le climat est accepté«, sagte der französische Außenminister am 12. Dezember 2015 zum Abschluss des Klimagipfels – im Saal und vor Bildschirmen fingen Menschen an zu jubeln. Das Abkommen ist der erste wirklich globale Klimavertrag und sieht vor, die Erwärmung der Welt »deutlich unter zwei Grad Celsius« zu halten, gemessen an den Temperaturen vor Beginn der Industrialisierung. Noch im gleichen Absatz verlangen die Vertragspartner sogar nach »Anstrengungen«, den Anstieg auf 1,5 Grad zu begrenzen, »da erkannt wurde, dass dies die Risiken und Auswirkungen der Klimaänderungen erheblich verringern würde«.

Dieses Limit in einem internationalen Vertrag verankert zu bekommen, schien lange völlig illusorisch, zumal die Hälfte der demnach erlaubten Erwärmung schon erreicht ist: 0,8 Grad. Um dem Traum von den anderthalb Grad eine reale Basis zu geben, hat der Weltklimarat IPCC auf Bitte der Pariser Konferenz im April 2016 beschlossen, 2018 einen Sonderbericht vorzulegen.

Im Mai sollten die Regierungen die Experten und Autoren nominieren, Mitte August will das Gremium die Struktur des Reports beschließen.

»Da bleibt nicht mehr viel Zeit«, sagt Katja Frieler vom Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK) und rechnet vom Erscheinungsdatum rückwärts: »Spätestens Ende 2017 wird wahrscheinlich die Einreichungsfrist für wissenschaftliche Veröffentlichungen als Grundlage für den Bericht ablaufen, also sollten unsere Daten Ende 2016 fertig sein, damit wir noch Zeit für die Auswertung, Interpretation und externe Begutachtung unserer Analysen haben.« Frieler koordiniert in Potsdam einen internationalen Vergleich von Computersimulationen, mit denen sich die Folgen des Klimawandels für Landwirtschaft, Fischerei, Gesundheitssystem, Küstenstädte oder Wasser- und Energieversorgung berechnen lassen. »ISIMIP« (Inter-Sector Impact Model Intercomparison Project) heißt das Vorhaben, das sich jetzt der 1,5-Grad-Welt zuwendet.

### **Es bleibt nicht mehr viel Zeit**

Was Erwärmung zum Beispiel bedeuten kann, zeigt sich schon heute beim Wechsel

der Jahreszeiten, sagt Tord Kjellström vom Health and Environment International Trust in Neuseeland. Er untersucht die Auswirkung von Temperaturen auf die Arbeitsproduktivität und erzählt gern von einer Fabrik in Kambodscha, wo 5000 junge Frauen Kleidung für Kunden in Industrieländern nähen. »Sie haben das ganze Jahr über die gleiche Tagesquote, aber im Sommer müssen sie zwei Stunden länger arbeiten als im Winter, um sie zu erfüllen«, sagt Kjellström. Die Hitze bremse die Leistung der Frauen; nur eine jahrzehntealte Anlage, die ein wenig gekühlte Luft durch die Hallen bläst, bringe Linderung. »Als ich da war, hat der Manager sogar geklagt, er müsse den Arbeiterinnen Suppe geben, weil sie länger als zwölf Stunden pro Tag im Betrieb sind.«

Eine weitere Erwärmung der Sommertage oder ein früherer Beginn der Jahreszeit könnten daher große Folgen haben. Elf Prozent der Arbeitskapazität dürften in Kambodscha durch ungebremsten Klimawandel verloren gehen, zeigte vor Kurzem ein Bericht des Entwicklungsprogramms der Vereinten Nationen; in Bangladesch wären es fast neun, in Indien acht Prozent. Für die Menschen und die Länder wären



**Demonstrantin auf einer Klimaschutz-Demo**

damit enorme wirtschaftliche Verluste verbunden; ein allmähliches Schließen der Wohlstandslücke zum industriellen Norden würde viel schwieriger. Ließe sich die Erwärmung allerdings auf 1,5 Grad begrenzen, so die Autoren des Reports, könnten die Staaten womöglich mit Anpassungsmaßnahmen gegensteuern.

Solche Aussagen wollen die Klimafolgenforscher um Katja Frieler nun mit Zahlen unterfüttern. Ihre Zusammenarbeit ist schon etabliert. Vor drei Jahren hatten 30 Arbeitsgruppen ihre Daten verglichen. Damals kam zum Beispiel heraus, dass bei einem beschleunigten Klimawandel schon im Jahr 2050 die Getreideerträge um elf Prozent sinken könnten, was die Preise um 20 Prozent steigen ließe. Diese Aussage beruhte auf den Daten von zwei Klima-, fünf Ernte- und neun Wirtschaftsmodellen. Jetzt aber geht es eher um einen entschleunigten Klimawandel, der zumindest im Rechenmodell auf 1,5 Grad globaler Erwärmung begrenzt wird – und inzwischen haben 100 Arbeitsgruppen ihr Interesse bekundet, an dem Vergleich teilzunehmen.

Viele von ihnen haben sich vergangene Woche am PIK zu einem internen Workshop getroffen, um ihr Programm zu koor-

dinieren. »Wenn wir die Ergebnisse wirklich vergleichen wollen, sollten wir alle die gleichen Szenarien benutzen«, sagt Frieler. »Und darauf haben wir uns auch geeinigt.«

Wie die Geräte einer hochwertigen HiFi-Anlage lassen sich in der Community der Modellrechner inzwischen die Module aneinanderkoppeln, mit denen sie in die Zukunft blicken. Für die ISIMIP-Arbeitsgruppen fing es an mit der Auswahl eines globalen gesellschaftlichen Szenarios. Die Frage ist doch: Werden Länder der Welt künftig stärker als bisher zusammenarbeiten, um Unterschiede schnell zu verringern und eine nachhaltige Entwicklung zu erreichen, oder weiter vor allem auf fossile Energieformen setzen und die Ungleichheit in so wie die Differenzen zwischen den Staaten noch steigern? Um solche Entwicklungen zu fassen, haben Klimaforscher fünf Prototypen entwickelt, die so genannten Shared Socioeconomic Pathways (SSP).

### **Wie viel Treibhausgas bringt die Zukunft?**

Für ihr Vergleichsprojekt haben sich die Arbeitsgruppen für das mittlere Szenario SSP2 entschieden, in dem die Welt nach historischem Muster weiterwurstelt und dabei langsame, nichtuniverselle Fort-

schritte erzielt. So werden die Staaten zum Beispiel die Erfüllung der (inzwischen von den Vereinten Nationen überarbeiteten) **Millenium-Entwicklungsziele** gleich um mehrere Jahrzehnte verpassen, heißt es in der Beschreibung. Das Szenario sieht etwa vor, dass die Bevölkerungszahl der Erde um 2070 herum bei gut 9,4 Milliarden Menschen ihren Höchstwert erreicht und dann wieder langsam fällt. Die Wirtschaftsleistung pro Kopf vervierfacht sich ungefähr.

Die Auswahl eines Klimaszenarios fiel leicht: Die 1,5-Grad-Grenze ist nur dann einzuhalten, wenn die Emissionen von Treibhausgasen bis 2020 nur noch sehr wenig steigen und danach deutlich fallen. Dieses Szenario heißt RCP2.6. Die Representative Concentration Pathways beschreiben mit den Ziffern am Ende den zusätzlichen Strahlungsantrieb in Watt pro Quadratmeter. Die Arbeitsgruppen, die Katja Frieler koordiniert, wollen die so definierte Welt mit einer vergleichen, die weitgehend auf Klimaschutz verzichtet und sich darum um 2,5 bis 3 Grad erwärmt.

Die Entwicklung des Klimas selbst, wie sich von Tag zu Tag die Temperaturen entwickeln, wo Niederschläge fallen, welche Winde wehen, berechnen vier verschiede-

ne Supercomputer in England, Frankreich, den USA und Japan. Hier laufen so genannte General Circulation Models, die die Welt und die Atmosphäre in lauter kleine Kästchen zerlegen und für jeden Tag bis zum Jahr 2100 berechnen, wie jedes davon seine Nachbarn beeinflussen könnte. Auch Extremereignisse wie Dürren oder Starkregen werfen die Klimasimulationen aus. Sie liefern den Computermodellen der ISIMIP-Gruppe die Daten, um die Erträge der Getreidefelder, die Häufigkeit von Überflutungen an Flüssen, das Potenzial für Windräder oder eben die Veränderungen der Arbeitsproduktivität zu berechnen.

Wie realistisch die simulierte Welt der ISIMIP-Forscher ist, hängt stark von der wirklichen Entwicklung der Emissionen in den kommenden 14 Jahren ab. Niklas Höhne vom New Climate Institute in Köln spricht ernste Warnungen aus. »Wenn die Nationen bis 2030 nur ihre bisher verkündeten Pläne verwirklichen, ist es fast unmöglich, die Erwärmung auf 1,5 Grad zu begrenzen«, sagt er. Der Grund liegt im zentralen Instrument des Pariser Vertrags, den INDCs (Intended Nationally Determined Contributions). Die Länder haben sich in diesen Dokumenten verpflichtet, ihre

Treibhausgasemissionen zu senken, aber das Ausmaß haben sie selbst bestimmt. Es gibt keine zentrale, völkerrechtlich relevante Instanz, die bewertet, ob der Beitrag groß genug ist, und womöglich Nachbesserungen verlangt.

### Eine Frage des Willens

Darum haben Umweltschützer und Forscher schon vor und während der Konferenz immer wieder betont, dass die bisherigen INDCs nicht genügen. In der Summe reichen diese Selbstverpflichtungen gerade, um die Erwärmung auf drei Grad zu begrenzen, hat Höhne mit seinem Team nun in einer »Nature«-Studie nachgerechnet. Verschärfen die Länder nicht schon bis 2020 oder 2025 ihre Ziele, wird der Weg zu einer Erwärmung von zwei Grad schwierig und unnötig teuer. Die Temperaturerhöhung auf 1,5 Grad zu begrenzen, könnte unmöglich werden, weil den Selbstverpflichtungen der Staaten zufolge bereits 2030 zu viele Treibhausgase in der Atmosphäre sind.

Zu einem ähnlichen Schluss kommt eine Arbeitsgruppe um Benjamin Sanderson von National Center for Atmospheric Research in Boulder, Colorado. Der Ausstoß

von Treibhausgasen müsse schon bis 2030 um fast ein Drittel sinken, und bis 2050 auf null fallen, um das 1,5-Grad-Limit einzuhalten, schreiben die Wissenschaftler in den »Geophysical Research Letters«.

Höhne gibt sich dennoch optimistisch – und richtet seinen Blick auf andere Akteure als nur die Staaten, zum Beispiel Städte und Großunternehmen. »Viele Firmen haben sich das Ziel gesetzt, sich schon 2020 oder 2025 komplett mit erneuerbarer Elektrizität zu versorgen«, sagt er. 68 Firmen zum Beispiel gehören mittlerweile zum Verbund [Re100.org](https://www.re100.org). Und eine andere Organisation, »We mean business«, hat soeben ausgerechnet, die Privatwirtschaft allein könne die in Paris zugesagten Reduktionen zu 60 Prozent abdecken, wenn 3000 Konzerne bis zum Jahr 2030 auf grünen Strom umstellten. »Viele Länder könnten ihre INDCs leicht übererfüllen«, ist Höhne überzeugt. Der 1,5-Grad-Traum ist demnach noch nicht ausgeträumt. ↩



Spektrum  
DER WISSENSCHAFT

KOMPAKT

# MIKRO- BIOM

Was unsere Bakterien  
über uns verraten

FÜR NUR  
€ 4,99

HIER DOWNLOADEN

**Spektrum**  
DER WISSENSCHAFT

# DIE WOCHE

DAS WÖCHENTLICHE WISSENSCHAFTSMAGAZIN

## Das Kombipaket im Abo: App und PDF

Jeden Donnerstag neu! Mit News, Hintergründen, Kommentaren und Bildern aus der Forschung sowie exklusiven Artikeln aus »nature« in deutscher Übersetzung. Im Abonnement nur 0,92 € pro Ausgabe (monatlich kündbar), für Schüler, Studenten und Abonnenten unserer Magazine sogar nur 0,69 €.

JETZT ABONNIEREN!

