

**Spektrum**  
der Wissenschaft

**KOMPAKT**

# KLIMASCHUTZ

Welche Wege führen zum Ziel?

**Pariser Abkommen**

Die Klimaziele wanken

**Kohlenstoffeinlagerung**

Ab in den Untergrund

**Energiepolitik**

Klimafaktor Indien



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

Liebe Leserin, lieber Leser,  
nie wussten wir mehr über den Klimawandel als heute. Gehandelt wird gegen die Erderwärmung jedoch eher im Schneckentempo. Wie viel Kohlendioxid können die Atmosphäre und globalen Ökosysteme noch aufnehmen? Welche Temperaturzunahmen müssen wir erwarten? Könnten wir Kohlendioxid nicht stattdessen als Rohstoff verwenden? Und hilft vielleicht nur Geoengineering gegen einen ausufernden Klimawandel? Unser neues Kompakt zum Thema »Klimaschutz« liefert Antworten auf eine der wichtigsten Fragen der Menschheit.

Einen interessanten Lesegenuss wünscht

Erscheinungsdatum dieser Ausgabe: 25.06.2018

Folgen Sie uns:



**CHEFREDAKTEURE:** Prof. Dr. Carsten Könneker (v.i.S.d.P.), Dr. Uwe Reichert  
**REDAKTIONSLEITER:** Dr. Hartwig Hanser, Dr. Daniel Lingenhöhl  
**ART DIRECTOR DIGITAL:** Marc Grove  
**LAYOUT:** Oliver Gabriel, Marina Männle  
**SCHLUSSREDAKTION:** Christina Meyberg (Ltg.), Sigrid Spies, Katharina Werle  
**BILDREDAKTION:** Alice Krüßmann (Ltg.), Anke Lingg, Gabriela Rabe  
**PRODUKTMANAGEMENT DIGITAL:** Antje Findekle, Dr. Michaela Maya-Mrschtik  
**VERLAG:** Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Tiergartenstr. 15-17, 69121 Heidelberg, Tel. 06221 9126-600, Fax 06221 9126-751; Amtsgericht Mannheim, HRB 338114, UStd-Id-Nr. DE229038528  
**GESCHÄFTSLEITUNG:** Markus Bossle, Thomas Bleck  
**MARKETING UND VERTRIEB:** Annette Baumbusch (Ltg.)  
**LESER- UND BESTELLSERVICE:** Helga Emmerich, Sabine Häusser, Ilona Keith, 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 [service@spektrum.de](mailto:service@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: © 2018 (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

KLIMAWANDEL  
Wie viel Kohlendioxid kann die Erde noch schlucken?

PJPHOTO69 / GETTY IMAGES / ISTOCK

SEITE  
20

KLIMAMANIPULATION  
Rettet uns das Geoengineering?

CAROL\_ANNE / GETTY IMAGES / ISTOCK

ENERGIEPOLITIK  
Klimafaktor Indien

SEITE  
46

HADYVAH / GETTY IMAGES / ISTOCK

RECYCLING IN AFRIKA  
Mit Unkraut und Kuhmist gegen Abholzung und Klimawandel

SEITE  
56

ADITYASHAH72 / GETTY IMAGES / ISTOCK

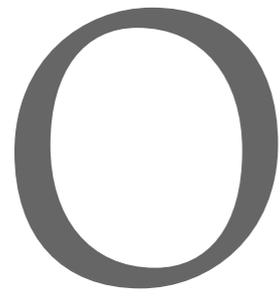
- 04 KLIMAWANDEL  
Wie viel Kohlendioxid kann die Erde noch schlucken?
- 11 PARISER ABKOMMEN  
Die Klimaziele wanken
- 17 BLICK IN DIE ZUKUNFT  
Der schlimmste Fall wird nicht ganz so schlimm
- 20 KLIMAMANIPULATION  
Rettet uns das Geoengineering?
- 27 KOHLENSTOFFEINLAGERUNG  
Ab in den Untergrund
- 32 TREIBHAUSGAS-RECYCLING  
Rohstoff Kohlendioxid
- 36 VON WEGEN ATOMAUSSTIEG  
Kernkraftwerke der Zukunft
- 41 CO<sub>2</sub>-FUSSABDRUCK  
So viel Kohlendioxid entsteht durchs Reisen
- 43 MORAL  
Moderner Ablasshandel
- 46 ENERGIEPOLITIK  
Klimafaktor Indien
- 56 RECYCLING IN AFRIKA  
Mit Unkraut und Kuhmist gegen Abholzung und Klimawandel

KLIMAWANDEL

# Wie viel Kohlendioxid kann die Erde noch schlucken?

von Roland Knauer

Nur ein Teil des Kohlendioxids, das die moderne Zivilisation beim Verbrennen von Kohle, Erdöl und Erdgas in die Luft bläst, bleibt auch in der Atmosphäre. Der Rest verschwindet in verschiedenen Senken von den Ozeanen bis zu den Wäldern. Fragt sich nur, ob diese stillen Helfer auch langfristig unsere Maßnahmen gegen den Klimawandel unterstützen.



Ohne die Hilfe der Natur hätte das von der modernen Zivilisation beim Verbrennen von Kohle, Erdöl und Erdgas in die Luft geblasene Kohlendioxid die Temperaturen an der Oberfläche der Erde bisher erheblich weiter als die gemessenen Werte in die Höhe getrieben. Doch dank einiger natürlicher Filter von den Weltmeeren bis zu den Wäldern wurde ein Teil dieses Klimagases wieder aus der Luft gefischt und weggepackt. Solche Kohlenstoffsinken sehen sehr unterschiedlich aus, funktionieren aber nach einem ähnlichen Grundprinzip: Sie wandeln das Kohlendioxid der Luft in andere Kohlenstoffverbindungen um, die so nicht mehr als Treibhausgas zur Verfügung stehen und daher auch das Klima nicht mehr anheizen können.

Eine ganz große Nummer spielen unter diesen Kohlenstoffsinken die Ozeane. Sie schlucken derzeit immer noch rund ein Viertel des Kohlendioxids, das fossile Kraftwerke, Öl- und Gasheizungen, Verbrennungsmotoren und Co sowie natürliche Quellen in die Luft blasen. Dieses Kohlendioxid löst sich im Wasser und wird zu Kohlensäure. Dabei wird der Luft Klimagas

entzogen, das allerdings die Ozeane saurer macht.

Aus Sicht des Klimaschutzes hat dieser Prozess neben der wachsenden Versauerung des Wassers ein weiteres Handikap: Er lässt sich kaum beschleunigen, weil Kohlendioxid ja über die Meeresoberfläche ins Wasser gelangt, die sich kaum vergrößern lässt. Obendrein kann die Wasserschicht an der Oberfläche nur eine begrenzte Menge Kohlendioxid speichern. Ist die Kapazität erschöpft, kann neues Klimagas erst dann wieder aufgenommen werden, wenn frisches Wasser zur Verfügung steht. Dauerhaft braucht dieser Prozess also Strömungen. Deren Geschwindigkeit wiederum setzt dem Austausch zwischen Luft und Wasser ebenfalls Grenzen. Daher stecken in den Weltmeeren riesige Wassermengen, die sehr viel Kohlendioxid aufnehmen können. Nur dauert das halt. »Lässt man ihnen viele Jahrtausende Zeit, können die Ozeane 73 bis 93 Prozent des von uns Menschen freigesetzten Kohlendioxids aufnehmen«, erklärt Andreas Oschlies vom GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung in Kiel. Die Meere können uns also retten, brauchen dafür aber sehr viel Zeit.

## **Stabilisator fürs Weltklima**

Auch der zweite Prozess, mit dem die Meere Kohlendioxid aus der Luft holen, braucht seine Zeit: die Verwitterung. Dabei reagiert zum Beispiel Basalt mit der aus Kohlendioxid entstandenen Kohlensäure im Wasser und bildet so genanntes Bikarbonat, das im Meerwasser längere Zeit gelöst bleibt. Letztlich entzieht die Verwitterung so der Luft Kohlendioxid.

»Langfristig halten diese Reaktionen in den Weltmeeren das Klima relativ stabil«, sagt Andreas Oschlies. Steigt zum Beispiel die Konzentration von Kohlendioxid in der Atmosphäre, treibt das die Temperaturen in die Höhe. Diese Wärme wiederum beschleunigt die Verwitterung, das Treibhausgas Kohlendioxid verschwindet dadurch schneller aus der Atmosphäre, und der Klimawandel wird gebremst. Sinken umgekehrt die Temperaturen, verwittert Basalt langsamer und entzieht so der Luft weniger Kohlendioxid. Mit der Zeit pendelt sich das Klima auch nach stärkeren Ausschlägen wieder ein.

So beruhigend dieser Rückkopplungsmechanismus zunächst auch klingt, entfaltet die Klimasenke Meer ihre volle Wirkung leider erst über etliche Jahrtausende.

Es sei denn, man beschleunigt die natürliche Verwitterung mit Hilfe von Baggern, Radladern und anderem Gerät. »Bei dieser künstlichen Verwitterung könnte man das reichlich vorhandene Gestein Basalt fein mahlen und es zum Beispiel in den Meeren nicht weit vor der Küste ausstreuen«, erläutert Andreas Oschlies, der Sprecher des über sechs Jahre laufenden Schwerpunktprogramms »Climate Engineering – Risiken, Herausforderungen, Chancen?« der Deutschen Forschungsgemeinschaft DFG. 20 bis 30 Prozent des von der modernen Zivilisation in die Luft geblasenen Kohlendioxids könnte diese künstliche Verwitterung wieder einfangen, haben die Forscher ausgerechnet.

### **Verwitterung beschleunigen**

Abgesehen vom Abbau, dem Raspeln des Gesteins und dem Transport zur Küste wäre diese Kohlenstoffsенке ein natürlicher Prozess, bei dem das Gesteinsmehl verwittert und dabei Kohlendioxid aus dem Wasser dauerhaft bindet. Vier Tonnen gemahlene Basaltgestein Olivin würden so eine Tonne Kohlenstoff aus dem Wasser entfernen, der anschließend in Form von Kohlendioxid wieder aus der

Luft aufgenommen wird. Derzeit werden beim Verfeuern von Öl, Gas und Kohle jedes Jahr etwa zehn Milliarden Tonnen Kohlenstoff freigesetzt, die man also mit rund 40 Milliarden Tonnen Gestein kompensieren könnte.

Theoretisch könnte man jedes Jahr einen Basaltberg von der Größe des Matterhorns zu feinem Pulver raspeln, das man anschließend vor der Küste im Meer verteilt. Das würde reichen, um die Hälfte der von uns Menschen verursachten Kohlendioxidemissionen auszugleichen. Diese Menge klingt zwar erst einmal utopisch, entspricht aber ungefähr den derzeitigen Bergbauaktivitäten. Der Vorteil dieser Methode: Sie funktioniert auch in kalten Gewässern. Und man muss ja nicht gerade das Matterhorn opfern, sondern könnte weniger spektakuläre Felsen verwenden. Am besten natürlich solche, die nicht weit von der Küste entfernt liegen, um Transportkosten zu sparen.

In den Weltmeeren verbergen sich aber noch weitere Kohlenstoffsенке. So könnte man den Südozean mit Eisen düngen und dort das Wachstum von Mikroalgen ankurbeln. Wenn viele dieser Organismen nach ihrem Tod auf den Meeresgrund sin-



STÉPHANE BIDOUZE / STOCK.ADOBE.COM

»Der Beitrag der Feuchtgebiete zur gesamten Klimabilanz ist nicht allzu groß«

[Martin Heimann]

ken, entziehen sie das beim Wachsen aufgenommene Kohlendioxid dem Klimakreislauf. Auch dieser Prozess ahmt einen natürlichen Vorgang nach: In Kaltzeiten sanken die Niederschläge, und kräftige Winde trugen riesige Mengen Staub von den Kontinenten ins Südpolarmeer. Das darin enthaltene Eisen ist dort Mangelware und wirkt daher als Dünger. Allerdings klappt dieser Prozess wohl nur im Südpolarmeer, weil dort reichlich Phosphat und Nitrat als weitere Dünger vorhanden sind. In den anderen Meeren sind diese Substanzen dagegen knapper, und eine Eisendüngung würde diese Vorräte rasch erschöpfen. Immerhin könnte im Südpolarmeer mit einer solchen Eisendüngung bis zu zehn Prozent des momentanen Kohlendioxid ausstoßes kompensiert werden.

### **Nebenwirkungen kaum erforscht**

Allerdings sind mögliche Nebenwirkungen einer solchen Maßnahme bisher kaum erforscht. Obendrein weiß niemand so recht, ob diese Kohlenstoffsенke nicht durch das Wirken des Menschen bereits geschädigt ist. Im Südpolarmeer haben früher die großen Wale mit ihren Ausscheidungen reichlich Dünger ausgebracht. Seit die Waljäger

die Bestände drastisch dezimiert haben, fehlt ein großer Teil dieses Düngers, und die Senke könnte einen Teil ihrer Wirksamkeit verloren haben.

In den Meeren könnte aber auch eine weitere Kohlenstoffsенke an Bedeutung gewinnen. Durch die Klimaerwärmung scheinen sich die Zonen mit sehr wenig Sauerstoff im Wasser erheblich auszuweiten. Dort werden mehr Nährstoffe freigesetzt, die Algenblüten düngen. In den sauerstofffreien Zonen sinken diese Organismen nach ihrem Absterben zu Boden und können dort nicht mehr von Sauerstoff atmenden Organismen abgebaut werden. So lagern sich die toten Algen als Faulschlamm am Grund der Meere ab. »Diese Schlamm-schichten sind gute Kohlenstoffsенken und verwandeln sich je nach den Umweltbedingungen im Lauf der Jahr-millionsen in Schiefer oder in Erdöl«, betont Andreas Oschlies.

Der Preis für eine solche Kohlenstoffsенke ist allerdings extrem hoch, weil der Faulschlamm ein komplettes Ökosystem durch eine Art Unterwasserwüste ersetzt: In diesen sauerstoffarmen Zonen überleben weder Fische, noch Krebse oder Tintenfische und viele andere Lebewesen.

### **Flickenteppich Dauerfrostboden**

Da hat das feste Land schon angenehmere Kohlenstoffsенken zu bieten: »Vom tropischen Regenwald bis zu den Dauerfrostböden Sibiriens holt die Biosphäre an Land rund 25 Prozent der von uns Menschen verursachten Kohlendioxidemissionen wieder aus der Luft«, sagt Martin Heimann vom Max-Planck-Institut für Biogeochemie in Jena und der Universität Helsinki. Mit 300 Meter hohen Messtürmen und einigen anderen Einrichtungen beobachten Martin Heimann und seine Kollegen in der Taiga und Tundra Sibiriens, in der Amazonasregion, auf den Shetland-Inseln und an etlichen anderen Orten der Erde, welche Mengen der Treibhausgase Kohlendioxid und Methan zwischen Luft und festem Land ausgetauscht werden. Die Forscher messen damit praktisch den Pulsschlag der Kohlenstoffsенken und -quellen.

Dieser Pulsschlag aber ist mancherorts alles andere als konstant. So speichern die riesigen Flächen der Dauerfrostböden in Sibirien und Nordamerika gigantische Mengen Kohlenstoff, den dort wachsende Pflanzen einst als Kohlendioxid aus der Luft gefischt und in Blätter, Holz, Wurzeln und andere Biomasse umgewandelt hat-

ten. Taut diese Kohlenstoffsенke im Sommer an der Oberfläche auf, zersetzen Mikroorganismen diese Überreste aus vergangenen Zeiten. Dabei entsteht erst einmal Methan, das ein viel stärkeres Treibhausgas als Kohlendioxid ist. Steigen dann auch noch die Temperaturen, taut der Dauerfrostboden länger auf und produziert entsprechend mehr Methan – die Kohlenstoffsенke droht sich in eine Quelle zu verwandeln.

Strömt dieses Methan zum Beispiel durch Schilfhalme rasch aus dem Boden an die Oberfläche, passiert das auch tatsächlich. Schon ein paar Meter weiter fehlen vielleicht die Schilfhalme, und das Methan steigt nur langsam im Boden nach oben. Unterwegs aber warten schon andere Mikroorganismen, die sich von Methan ernähren und dabei das viel schwächere Treibhausgas Kohlendioxid produzieren. So entsteht in den Dauerfrostböden Sibiriens ein schwer überschaubarer, gigantischer Fleckenteppich, aus dem jeder Fleck andere Mengen von Treibhausgasen freisetzt.

Die höheren Temperaturen geben den Pflanzen auf diesen Dauerfrostböden im Sommer auch mehr Zeit zum Wachsen,

gleichzeitig beschleunigt der steigende Kohlendioxidgehalt der Luft das Wachsen weiter. So holt die Vegetation mehr Kohlendioxid aus der Luft. »Insgesamt wirkt die Tundra daher vermutlich immer noch als Kohlenstoffsенke«, fasst Martin Heimann die Situation zusammen.

Ähnliches gilt auch für die Feuchtgebiete anderer Breiten: In den Tiefen dieser Sümpfe zersetzen Mikroorganismen Pflanzenreste und produzieren so das Treibhausgas Methan, das auf dem Weg nach oben langsam von anderen Mikroorganismen abgebaut und in Kohlendioxid verwandelt wird. Gleichzeitig holen die Pflanzen oben jede Menge Kohlendioxid aus der Luft und speichern das Klimagas als Biomasse. Die toten Pflanzenreste werden nur zum Teil wieder in Klimagase zurückverwandelt. Dadurch wächst die im Boden gespeicherte Biomasse langsam weiter, und die Feuchtgebiete bleiben eine Kohlenstoffsенke. »Allerdings ist ihr Beitrag zur gesamten Klimabilanz nicht allzu groß«, schränkt Martin Heimann ein.

Ganz anders sieht es dagegen bei den Bäumen aus. »Von der gesamten Vegetation auf dem Land nehmen Wälder das meiste Kohlendioxid auf«, erklärt Lena Boysen

vom Max-Planck-Institut für Meteorologie in Hamburg. Insgesamt holen die Pflanzen an Land jedes Jahr 120 Milliarden Tonnen Kohlenstoff aus der Luft, von denen die eine Hälfte dauerhaft im Pflanzenmaterial bleibt, während die Gewächse die andere Hälfte wieder ausatmen. Von diesen 60 Milliarden Tonnen Kohlenstoff, die jährlich in den Pflanzen festgehalten werden, speichern die Wälder der Tropen rund 40 Prozent und die Wälder außerhalb der Tropen weitere 25 Prozent. An Land sind also die Wälder die mit Abstand bedeutendste Kohlenstoffsенke. Allerdings wird der allergrößte Teil dieses in den Pflanzen festgehaltenen Kohlenstoffs, wenn das Laub abfällt oder nach dem Tod der Gewächse, wieder als Treibhausgas frei, so dass die Vegetation jährlich in der Gesamtbilanz nur zwei oder drei Milliarden Tonnen Kohlenstoff längerfristig speichert. Das wiederum entspricht einem guten Viertel der Kohlendioxidemissionen, für die wir Menschen verantwortlich zeigen.

Völlig zu Recht nennen wir die Wälder daher eine »grüne Lunge«, die jedoch genau umgekehrt wie unsere eigene Lunge funktioniert: Wälder atmen Kohlendioxid ein und Sauerstoff aus, die menschliche

Lunge macht es andersherum. Allerdings funktioniert nicht jeder Wald gleich gut als Kohlenstoffsенke. So holen in einem Wirtschaftswald die Bäume zwar reichlich Kohlendioxid aus der Luft. Nur holen die Förster eben auch etliche Bäume aus diesen Wäldern. Wird deren Holz verbrannt, wird das vorher gespeicherte Kohlendioxid wieder frei, und die Kohlenstoffsенke ist keine mehr. Werden aus dem Holz Möbel, Gebäude oder Konstruktionen gemacht, verlängert sich die Wirkung als Kohlenstoffsенke zwar deutlich, dauerhaft ist sie trotzdem nicht. »Das aus den Wäldern geholte Holz wandert nicht mehr in den Boden und wirkt so nicht mehr als Kohlenstoffsенke«, bewertet Lena Boysen die Situation.

Die effektivste Kohlenstoffsенke sind daher nicht genutzte Wälder, und die werden ebenfalls Mangelware. Obendrein setzt der Klimawandel mancherorts den Wäldern erheblich zu. So haben längere Trockenperioden am Anfang des 21. Jahrhunderts an der kanadischen Pazifikküste Insektenplagen ausgelöst, die Wälder auf einer Fläche von der Größe Deutschlands vernichtet haben. Schlagartig wurden diese Regionen so von einer Kohlenstoffsенke zu einer Quelle.

## **Schadet Aufforsten dem Klima?**

Trotzdem bleiben Wälder die wichtigste Kohlenstoffsенke an Land und das Klimaschutz-Übereinkommen von Paris wünscht daher, Wälder anzupflanzen, um den Klimawandel zu bremsen. Allerdings sollten sehr große, weitgehend kahle Flächen wie die Sahara in Wald verwandelt werden, um einen kräftigen Effekt zu erzielen. Diese Wälder könnte man mit Grundwasser versorgen und so eine Fläche von der Größe der Vereinigten Staaten von Amerika aufforsten. Nur hätte eine solche Klimasenke durchaus Nebenwirkungen, fasst Andreas Oschlies Modell-Rechnungen des DFG-Schwerpunkt-Programms zusammen. So würde die brennende Sonne der Subtropen viel Wasser aus diesen neuen Wäldern verdunsten. Das meiste davon würde zwar auf die Sahara zurückregnen. Ein kleiner Teil aber würde am Ende in den Ozeanen landen und so den Meeresspiegel bis zum Ende des 21. Jahrhunderts um zusätzliche 13 Zentimeter steigen lassen.

Dazu kommt ein weiterer Effekt: Bisher reflektiert die vorher kaum bewachsene Wüste das meiste Sonnenlicht in Richtung Weltraum zurück. Dunkle Wälder würden

dagegen einen großen Teil der Strahlung und damit viel mehr Wärme aufnehmen. Das könnte die Windsysteme und so den Monsunregen ändern, auf den Länder wie Indien angewiesen sind. Vor allem aber könnten die Wälder der Sahara so viel Sonnenlicht zusätzlich einfangen, dass die Durchschnittstemperaturen auf dem Globus steigen würden, zeigen die Computerberechnungen. Das Aufforsten der Sahara könnte also eine Kohlenstoffsенke schaffen und trotzdem das Klima aufheizen. Auch in anderen Weltgegenden sollte man sich keine allzu großen Hoffnungen auf die Kohlenstoffsенke Aufforstung machen: In der Theorie könnte man zwar weltweit bis zu 30 Millionen Quadratkilometer und damit eine Fläche von der Größe des zweitgrößten Kontinents Afrika aufforsten. Solange dieser Wald wächst und nicht wieder abgeholzt wird, könnte er etwa zwei Drittel der von uns Menschen verursachten Treibhausgasemissionen wieder aus der Luft holen. In der Praxis aber steht viel weniger Land für eine Aufforstung zur Verfügung, weil ein großer Teil der möglichen Aufforstungsflächen schon heute für Äcker und Weiden genutzt wird und auch in Zukunft für die Ernährung benötigt wird.



»Das aus den Wäldern  
geholte Holz wandert nicht  
mehr in den Boden und wirkt  
so nicht mehr als  
Kohlenstoffsенke«

[Lena Boysen ]

Die Böden dieser Äcker, Wiesen und Weiden zählen wiederum zu den großen Unbekannten im Hinblick auf ihre Wirkung als Kohlenstoffsенken und Quellen. Wohl weil sie schlicht zu vielfältig sind. Zwar gibt es durchaus Fortschritte wie neue Reissorten in China, die weniger lang überflutet werden als herkömmliche Sorten. »Entwickelt wurden diese Sorten, um Wasser zu sparen«, erklärt Martin Heimann. Für die Klimabilanz haben sie trotzdem eine angenehme Nebenwirkung: Weil nur überflutete Reisfelder das Klimagas Methan in großen Mengen freisetzen, heizen Reisfelder seither das Klima weniger auf.

### **Biokohle als Kohlenstoffsенke**

In der Landwirtschaft könnte eine weitere Entwicklung in Zukunft neue Kohlenstoffsенken schaffen: Die Bauern könnten Biokohle in den Boden einarbeiten. Das ist im Prinzip Holzkohle, die zum Beispiel aus Pflanzenresten hergestellt werden kann. Dabei entsteht zwar aus einer Hälfte der Biomasse Kohlendioxid, die andere Hälfte wird zu Biokohle. Diese verbessert die Eigenschaften des Bodens enorm, weil sie von winzigen Löchern und Kratzern übersät ist, die ihre Oberfläche stark vergrößern.

Diese große Oberfläche hält Nährstoffe, Wasser und für die Bodenfruchtbarkeit wichtige Mikroorganismen sehr gut fest. Das aber steigert die Erträge. Und das, ohne die Biokohle nennenswert zu verbrauchen.

Die Biokohle bleibt offensichtlich sehr lange Zeit und vielleicht sogar viele Jahrtausende im Boden und speichert das Kohlendioxid, das die Pflanzen einst aus der Luft holten, aus denen die Biokohle hergestellt wurde. Diese Kohlenstoffsенke könnte ebenfalls zehn Prozent des heute von uns Menschen freigesetzten Kohlendioxids dauerhaft im Ackerboden binden, lassen erste Schätzungen vermuten.

Allerdings stehen solche Schätzungen noch auf sehr wackligem Beinen, weil bisher niemand den gesamten Kreislauf gut abgeschätzt hat. Und weil überhaupt nicht klar ist, welche Mengen von Biomasse für diese Methode überhaupt zur Verfügung stehen könnten. Einfache und rasche Lösungen für den hausgemachten Klimawandel stellen also auch die Kohlenstoffsенken auf der Erde nicht dar. Aber sie mildern immerhin das Problem. ↩

(Spektrum – Die Woche, 17/2018)



PARISER ABKOMMEN

# DIE KLIMAZIELE WANKEN

von Christopher Schrader

Wie stark darf sich die Erde erwärmen, ohne dass der Klimawandel vollends aus dem Ruder läuft? Denn die Zwei-Grad-Grenze gerät langsam außer Reichweite.

**E**s ist ein Traum mit Ablaufdatum. Die Weltgemeinschaft gibt sich ihm seit einem Moment kollektiver Euphorie hin: damals im Dezember 2015 in Paris. Als der französische Außenminister Laurent Fabius seinen Spielzeughammer fallen ließ und das Pariser Abkommen als »accepté« erklärte, jubelten die Delegierten im Saal. Sie hatten gerade beschlossen, die Erwärmung der Erde durch den Klimawandel zum Ende des Jahrhunderts auf »deutlich unter zwei Grad« zu begrenzen, möglichst sogar auf 1,5 Grad Celsius. Wie im Rausch wurde das Abkommen noch vor der Wahl von US-Präsident Donald Trump ein knappes Jahr später ratifiziert und in Kraft gesetzt.

Aus diesem Traum rüttelt der Weltklimarat IPCC die Gemeinschaft der Staaten demnächst auf. Die Wissenschaftler bereiten für den Herbst 2018 einen Sonderbericht zur 1,5-Grad-Grenze vor; Mitte Januar ist ein Entwurf der Zusammenfassung des eigentlich noch vertraulichen Reports publik geworden, aus der die Skepsis der Forscher spricht. Das Gremium mit Sitz in Genf beeilte sich zwar zu verkünden, seine Schlussfolgerungen könnten sich bei der weiteren Arbeit noch ändern – das sei ja schließlich der

Zweck, wenn man einen Entwurf zum Kommentieren herumschicke. Doch hinter einige zentrale Feststellungen dürfte der IPCC kaum noch zurückkommen.

Eine davon lautet: Ein Grad Erwärmung ist bereits erreicht, und es gibt keinen erkennbaren Entwicklungspfad mehr, wie die Welt mit erprobten Mitteln und bei Erfolgsaussichten von 66 Prozent die Erwärmung bei höchstens 1,5 Grad halten kann. Wissenschaftler können nur noch Szenarien anbieten, die von diesem erwünschten Ausgang abweichen. Entweder übersteigen die Temperaturen die Grenze einige Jahrzehnte lang und sinken dann wieder, weil »negative Emissionen« oder allgemeiner »Geoengineering« eingesetzt wurden. Oder die vorgezeichnete Entwicklung bietet nur noch eine 50-Prozent-Chance, die Grenze zu halten. Ersteres bedeutet, zusätzlich zu den dramatischen Veränderungen im Energiesystem überhastet in eine Technologie zur künstlichen Kühlung der Erde einzusteigen. Zweites birgt die Aussicht, dass ein Scheitern genauso wahrscheinlich wird wie der Erfolg.

### **Nationale Egoisten**

Und selbst diese zwiespältige Chance, am Ende des Jahrhunderts die Erwärmung auf

1,5 Grad zu begrenzen, könnte die Menschheit leicht vertun. Als jetzt ein großes internationales Team von Wissenschaftlern um Joeri Rogelj vom International Institute für Applied Systems Analysis in Laxenburg in Österreich in »Nature« über Wege in eine 1,5-Grad-Zukunft berichtete, musste es einige Fälle von Scheitern einräumen. Die dafür genutzten Computerprogramme versagten in einigen Fällen, wenn die Welt in der Simulation den Kohleverbrauch oder die Ungleichheit nicht in den Griff bekam. Dann suchten die modellierten Länder nämlich allein den eigenen, vermeintlichen Vorteil und verweigerten sich Maßnahmen, die der Gemeinschaft der Staaten genutzt hätten.

Nationale Egoisten könnten auch auf anderem Feld den Erfolg torpedieren: »Schon ein kleiner Energieboom in der Arktis könnte jede Chance zerstören, dass die Welt die Aufheizung unterhalb gefährlicher Niveaus begrenzt«, warnt die Klimawissenschaftlerin Katharine Hayhoe von der University of Texas in Lubbock in den »Environmental Research Letters«. Ihr Argument lautet so: Wenn die Polarregion durch das frühere Abschmelzen der Eismassen besser zugänglich wird, könnten

auch die dort vermuteten Vorräte von Öl und Gas bald ausgebeutet werden. Würden sie aber gefördert und verbrannt, dann gelangten enorme zusätzliche Mengen Kohlendioxid in die Atmosphäre und würden die Erwärmung schnell an jeder Grenze vorbeitragen.

### **Das Diktat des Kohlenstoffbudgets**

Ganz generell ist die Aussicht befristet, das ehrgeizigere der Pariser Klimaziele einzuhalten, sagt der IPCC. Dafür müssten die Voraussetzungen bald geschaffen werden, aber die Staaten der Welt sind noch nicht annähernd auf dem richtigen Pfad. Was sie sich bisher vorgenommen haben, begrenzt die Erwärmung im Jahr 2100 bestenfalls auf 3,2 Grad Celsius, bilanziert die Initiative Climate Action Tracker. Gelingt auf den Klimagipfeln Ende 2018 in Krakau und Ende 2019 (Ort noch unbekannt) keine erkennbare, effektive Trendwende, so der Weltklimarat, heißt es bereits 2030: ausgeträumt! Dann sind zu dem Zeitpunkt bereits so viele Treibhausgase in der Atmosphäre, dass die Erwärmung mehr als 1,5 Grad betragen muss.

Das entscheidende Maß für die Frage, welches Klimaziel noch zu erreichen ist, heißt in der Wissenschaft Kohlenstoffbud-



**KÜSTENEROSION IN DER ARKTIS**  
Durch schwindendes Meereis sind die arktischen Küsten stärkerer Brandung ausgesetzt. Gleichzeitig taut der Permafrost, so dass der torfige Tundraboden dem Angriff des Meeres nichts entgegenzusetzen hat.

get. Es gibt wie beim Haushaltsentwurf einer Regierung an, welche Ausgaben – oder hier: Emissionen – möglich sind. Der Unterschied ist nur: Das Budget bezieht sich nicht auf ein Jahr. Die Zahlen sind endgültig. Die Welt muss mit diesen Mengen zu-rechtkommen oder scheitern.

Allerdings schwanken die genannten Werte in der Wissenschaft noch stark. Der IPCC verkündet im Berichtsentwurf für die 1,5-Grad-Grenze folgende Budgets: Genügt der Menschheit eine 50-prozentige Erfolgswahrscheinlichkeit, kann sie – umgerechnet auf das Startdatum Januar 2018 – noch 510 Milliarden Tonnen CO<sub>2</sub> ausstoßen. Für den Fall, dass die Staaten der Welt sich mit Geoengineering eine Erfolgchance von 66 Prozent erkaufen, lautet die entsprechende zentrale Schätzung 320 Milliarden Tonnen. Hier ist die Zahl aber mit einer großen Unsicherheit behaftet: Es könnten auch etwas weniger als die Hälfte oder etwas mehr als das Doppelte sein.

Was die Zahlen bedeuten, zeigt eine einfache Rechnung: Bleiben die Emissionen auf dem Niveau der vergangenen Jahre (bei jeweils knapp 40 Milliarden Tonnen Kohlendioxid), muss die Menschheit entweder ab 2026 alle danach freigesetzten Treib-

hausgase wieder zurückholen (dann sind 320 Gigatonnen erschöpft) oder darf ab 2031 netto nichts mehr ausstoßen (wenn 510 Gigatonnen mehr als heute in der Atmosphäre schweben).

Andere Wissenschaftler, zum Beispiel Mark Lawrence vom Institut für transformative Nachhaltigkeitsforschung (IASS) in Potsdam, kommen auf eine ähnliche Deadline: Anfang der 2030er Jahre vergeht jede Chance, die Erwärmung nach dem Pariser Ziel auf 1,5 Grad zu begrenzen, wenn die Weltgemeinschaft dann nicht bereits längst den richtigen Weg eingeschlagen hat. Kaum mehr Zeit veranschlagt ein Team um Philipp Goodwin von der Universität Southampton in »Nature Geoscience«: Einer Berechnung mit 30 000 Varianten zufolge ist das Budget für eine 1,5-Grad-Zukunft 2033 oder 2034 erschöpft. Angesichts solcher Zahlen dürfte sich kaum noch jemand finden, der mit ehrlichem Optimismus verkündet: »Das schaffen wir.«

### **Welche Grenze können wir schaffen?**

Zieht sich die Menschheit auf das Ziel zurück, die Erwärmung (mit 66-prozentiger Erfolgswahrscheinlichkeit) auf maximal 2,0 Grad zu begrenzen, liegt das Kohlen-

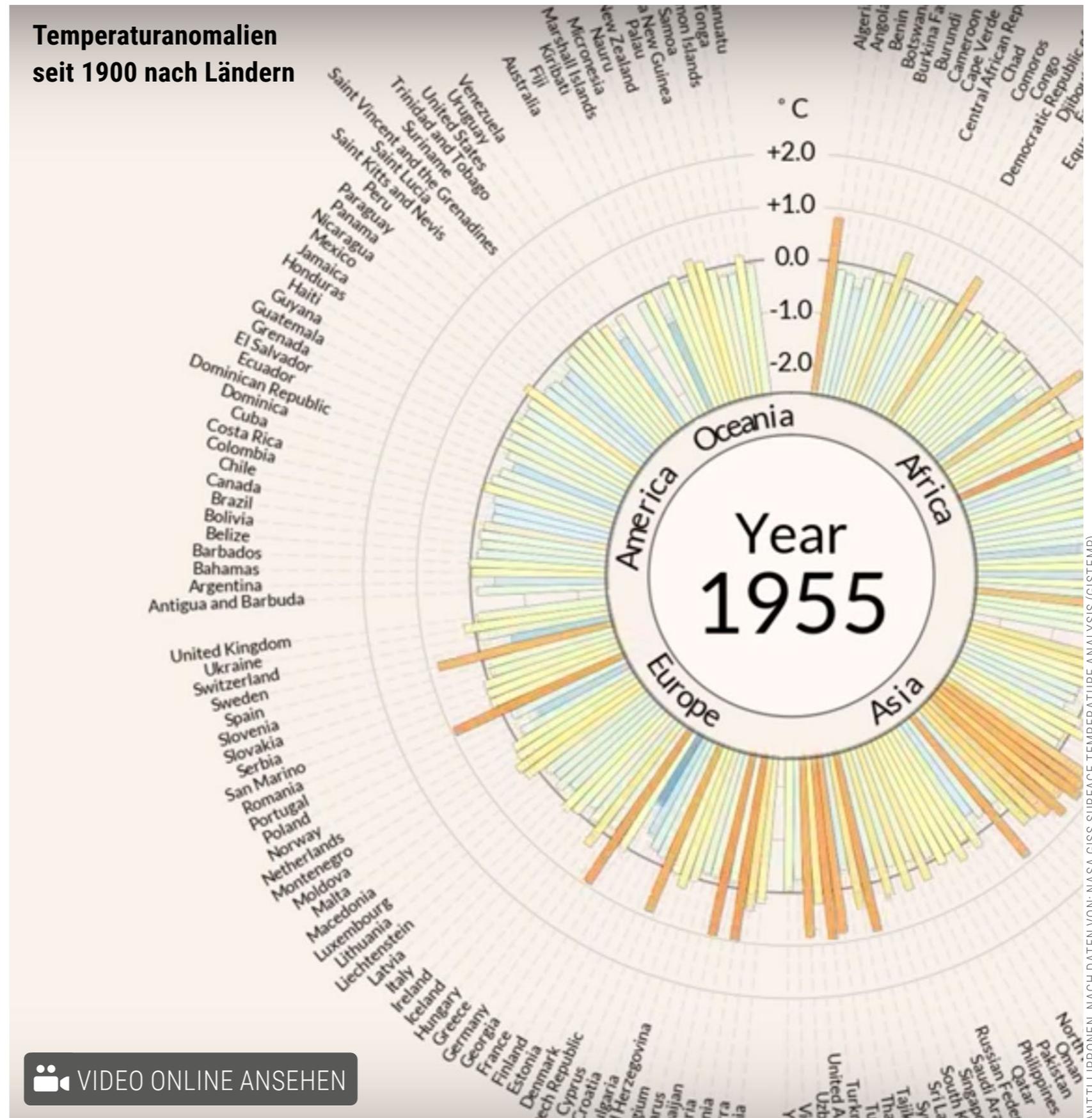
stoffbudget höher. Dann dürfen die Staaten laut IPCC-Entwurf noch 840 bis 1110 Milliarden Tonnen CO<sub>2</sub> freisetzen, je nachdem, ob sie negative Emissionen gegenrechnen, also Geoengineering betreiben, oder nicht. Bei heutigem Ausstoß blieben damit 25 bis 33 Jahre Zeit. Das Team um Philipp Goodwin rechnet sogar mit 35 bis 41 Jahren. Zusammengefasst bedeutet das, dass die Welt irgendwann zwischen den frühen 2040er und den späten 2050er Jahren aufhören muss, Kohlendioxid in die Atmosphäre zu entlassen.

Auf diese Strategie läuft auch ein Aufruf hinaus, den im Herbst 2017 eine hochkarätige, internationale Expertengruppe vom Institute for Governance and Sustainable Development (ISDG) veröffentlicht hat. Zu den Leitern des 30-köpfigen Teams gehörte der mexikanische Nobelpreisträger Mario Molina, der einst für die Arbeit zum Ozonloch ausgezeichnet wurde. »Der Klimawandel ist ein dringendes Problem, das dringende Lösungen verlangt«, sagte er bei der Vorstellung des Reports. Die Emissionen von Kohlendioxid müssten darum möglichst schon 2020 ihren Höhepunkt erreichen, dann deutlich sinken und gegen 2050 die Nulllinie erreichen.

Flankierend solle die Welt sich darauf vorbereiten, im Lauf des Jahrhunderts bis zu eine Billion Tonnen CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre zu entnehmen, fordern die ISDG-Experten. Sie bezeichnen das als Versicherungspolice für den Fall, dass die Emissionen eben nicht 2020, sondern erst 2030 zu fallen beginnen.

### Spätestens ab 2020 ist Handeln angesagt

Wie genau die Welt die Zeit bis 2050 nutzen soll, dafür gibt es verschiedene Vorschläge. »Fangen wir schon 2020 mit einer jährlichen dreiprozentigen Senkung an und halten das zehn Jahre durch, dann genügt dieses Tempo auch nach 2030 bis 2100«, sagt zum Beispiel Mark Lawrence. »Warten wir hingegen bis 2030, dann bräuchten wir danach Emissionssenkungen von fünf Prozent pro Jahr für den Rest des Jahrhunderts.« Umgerechnet auf Jahrzehnte bedeuten Lawrence' Zahlen, dass die Emissionen im Lauf der 2020er Jahre um insgesamt 27 oder während der 2030er Jahre um 40 Prozent sinken müssten – vielen Beobachtern und ökonomischen Modellen zufolge, die in der Rogelj-Studie verwendet wurden, sind solche Reduktionen kaum machbar.



Doch es gibt noch radikalere Vorschläge: 50 Prozent Reduktion bis 2030 fordert ein Team um Johann Rockström vom Stockholm Resilience Center; dazu gehörte auch Hans Joachim Schellnhuber, Leiter des Potsdam-Instituts für Klimafolgenforschung, dem Rockström demnächst als einer von zwei neuen Direktoren nachfolgen soll. Laut dem vorgeschlagenen »Kohlenstoff-Gesetz« der Autoren soll sich der Ausstoß in den 2020er, 2030er und 2040er Jahren jeweils halbieren und so von ungefähr 40 Milliarden Tonnen 2020 auf fünf Milliarden Tonnen 2050 fallen. Etwa diese Menge müsste in jenem Jahr gezielt aus der Atmosphäre entnommen werden können, damit der Saldo bei null liegt.

Besonders in den 2020er Jahren stünde die Welt darum vor »Herkulesaufgaben«, so die Rockström-Gruppe, und im Jahrzehnt danach seien »viele Durchbrüche« nötig, weil zum Beispiel Erdöl zum Ende des Zeitraums praktisch überhaupt nicht mehr verwendet werden soll. Autos haben dann kaum noch Verbrennungsmotoren oder tanken wie Flugzeuge künstliche, mit erneuerbarem Strom erzeugte Kraftstoffe.

## Was ist mit Methan und Co?

Und als wäre all das nicht schon schwierig genug, darf der Fokus laut den Experten nicht allein auf Kohlendioxid liegen. Besonderer Aufmerksamkeit bedürfen in Zukunft vor allem die anderen Treibhausgase, Partikel und Aerosole: Methan, Ruß, Fluor- und Stickstoffverbindungen. Diese Stoffe erwärmen die Erde pro Kilogramm teilweise deutlich stärker als CO<sub>2</sub>, sind aber meist kurzlebiger und in geringeren Konzentrationen vorhanden. Sie mit Kohlendioxid zu vergleichen, ist kompliziert, ihr Beitrag zur momentanen Erwärmung dürfte geschätzt bei 25 bis 30 Prozent liegen.

Die Expertengruppe um Mario Molina gibt darum ein weiteres Ziel aus: die kurzlebigen, potenten Treibhausgase bis 2020 deutlich zu reduzieren. Methan zum Beispiel entsteht in Reisfeldern, Kuhmägen und offenbar zunehmend bei unkonventionellen Erdgasbohrungen (»Fracking«); Ruß stammt aus Schiffs- und Dieselmotoren sowie aus Kochfeuern, die mit Holz oder Dung angeheizt werden. Und manche Fluorverbindungen entweichen als Ersatzstoffe für inzwischen gebannte Kühlmittel aus Klimaanlage – werden aber bereits durch das Abkommen von Kigali erfasst.

Mit effektiver Regulierung könne und müsse die Welt bei diesen Substanzen schnelle Erfolge erzielen, erklärt das Expertenteam. Beim IPCC klingt es ähnlich.

Sind die Klimaziele des Pariser Vertrages also noch zu erreichen? Die Antwort wird sich die Welt in den kommenden zehn Jahren selbst geben. Folgendes ist aber schon erkennbar. Erstens: Die Erwärmung auf 1,5 Grad zu begrenzen, setzt rapide, weit reichende Veränderungen voraus. Zurzeit ist der politische Wille dazu nicht besonders erkennbar. Zweitens: Passieren in den 2020er Jahren keine einschneidenden Weichenstellungen, lautet die Antwort in Bezug auf das ehrgeizigere Pariser Ziel vermutlich »Nein«. Drittens: Die Aufheizung der Atmosphäre »deutlich unter 2,0 Grad« zu stoppen, ist ein wenig einfacher, aber keinesfalls einfach. Es setzt einen radikalen Wandel in Wirtschaft, Gesellschaft und Politik innerhalb der kommenden beiden Jahrzehnte, möglichst auch bis 2030 voraus. ↩

(Spektrum – Die Woche, 12/2018)

KLIMAWANDEL

# DER SCHLIMMSTE FALL WIRD NICHT GANZ SO SCHLIMM

von Christopher Schrader

Eine Studie schließt die stärksten Erwärmungsszenarien aus – und die schwächsten. Doch wie hilfreich ist die neu berechnete Klimasensitivität wirklich?



**E**in besonders milder, langsamer und harmloser Verlauf des Klimawandels ist nach einer neuen Studie unwahrscheinlich, ebenso wie ein katastrophal schneller. Ein Team um Peter Cox von der University of Exeter hat eine Schlüsselgröße des Klimawandels deutlich genauer bestimmt als bisher. Es geht um die »equilibrium climate sensitivity« (ECS; Gleichgewichtsklimaempfindlichkeit), sie gibt die Reaktion auf eine Verdopplung der Treibhausgase an. Demnach würde sich die Erde in diesem Fall vermutlich um 2,8 Grad Celsius erwärmen, jedenfalls läge der Wert wahrscheinlich zwischen 2,2 und 3,4 Grad.

Bislang gilt für die ECS die Angabe des Weltklimarats IPCC in seinem Bericht von 2013: Die zentrale Schätzung lag bei 3,0 Grad; die Spanne reichte von 1,5 bis 4,5 Grad. »Sehr niedrige oder sehr hohe Werte schließt unsere Studie jetzt praktisch aus«, sagt Cox. Und die ECS sei nicht nur eine lebensferne Rechengröße: Auch besonders drastische oder kaum zu bemerkende Veränderungen zum Beispiel bei Hitzewellen und Starkregenereignissen seien damit vom Tisch.

### **Den schlimmsten Fall ausgeschlossen**

Erst im Dezember hatten Forscher von der kalifornischen Carnegie Institution den oberen Bereich der IPCC-Spanne ausgereizt und für die ECS einen Mittelwert von 3,7 Grad errechnet. Solche Angaben am oberen Limit machen Forschern Sorgen. Läge die Sensitivität wirklich so hoch, könnte die internationale Klimapolitik kaum noch ihre Ziel erreichen, die Erwärmung zu begrenzen. »Wir sind im Augenblick wegen unserer Emissionen bereits auf eine Erwärmung festgelegt, die der Hälfte der ECS-Angabe entspricht«, erklärt Cox. »Nach unserer Berechnung sind wir damit sehr nahe an der 1,5-Grad-Grenze des Pariser Vertrags, aber wir haben noch eine Chance, die zwei Grad zu vermeiden.«

Bisher ist die ECS schon mehr als 150-mal bestimmt worden, meist durch Blicke in die Vergangenheit: Wie hat zum Beispiel die Erde in der Eiszeit auf die deutlich veränderten Bedingungen und Treibhausgas-mengen reagiert? Der Kniff von Cox' Team nun ist, dass es nicht die absoluten Werte der Temperatur betrachtet, sondern die Variabilität, also die kurzfristigen Schwankungen innerhalb eines längeren Zeitraums. Die Reaktion des Klimas auf kleine

und große Störungen sei gekoppelt, vermuten die englischen Forscher. Außerdem kann es tatsächlich einfacher sein, relative Abweichungen zu bestimmen als absolute Werte. Das sei eine »beneidenswert simple Idee«, schreibt Piers Foster von der University of Leeds in einem Kommentar in »Nature«. Und da die Kollegen nun die hohen Werte für die ECS und die Sorgen der Wissenschaftler für unrealistisch erklären, könne er auch besser schlafen.

### **Hilft uns die ECS weiter?**

Stefan Rahmstorf vom Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung hingegen ist weniger überzeugt: »Kurzfristige Temperaturschwankungen von Jahr zu Jahr eignen sich grundsätzlich weniger gut, um die langfristige Gleichgewichtsreaktion des Klimas zu bestimmen, als Daten über längerfristige Temperaturveränderungen der Vergangenheit«, sagt er. Andere Forscher merken in Reaktionen auf die Studie an, Cox' Team habe zwar ein neues Prinzip für die Bestimmung der ECS etabliert, aber nun müssten genauere Studien folgen. Doch auch Gabriele Hegerl, eine deutsche Forscherin an der University of Edinburgh, ist überzeugt, »dass eine sehr hohe und



sehr niedrige Sensitivität weniger wahrscheinlich ist«, wie neuere Studien und »diese sehr schöne Arbeit« belegten.

Insgesamt sieht Hegerl die künstliche Größe ECS jedoch eher kritisch. Diese gibt nämlich an, wie sehr sich die Erde aufheizen würde, wenn man die Menge der Treibhausgase auf einen Schlag verdoppelte und dann einige Jahrhunderte wartete, bis sich das Klima auf einem neuen Niveau einpendelt. Das ist eine unrealistische Vorstellung, die höchstens einen Eindruck liefert – so als würde man aus der eventuellen Höchstgeschwindigkeit eines Autos bei Vollgas auf beliebig langer, gerader Strecke etwas über seine Eignung für eine Berg-Rallye ablesen wollen. Übersetzt in die Klimaforschung bedeutet das: Die Forschung kann der Wissenschaftlerin aus

Schottland zufolge mehr mit der »transient climate response« (TCR; Übergangsklimareaktion) anfangen; diese sei auch besser zu bestimmen, stellte Hegerl im September 2017 fest. Der Wert misst die erreichte Erwärmung nach einem langsamen Anstieg der Treibhausgase in dem Jahr, in dem diese sich im Vergleich zum vorindustriellen Wert von 280 ppm (parts per million) verdoppelt haben; die Erwärmung ginge danach aber selbst ohne zusätzliche Emissionen weiter. Die TCR liegt laut IPCC zwischen 1,0 und 2,5 Grad. Diese Verdopplung von Kohlendioxid und anderen Substanzen in der Atmosphäre könnte bei einem ungebremsten Ausstoß schon 2050 erreicht sein. ↩

(Spektrum – Die Woche, 04/2018)

Spektrum  
der Wissenschaft

KOMPAKT



Genomanalysen | Gendaten für die große Wanderkarte  
Australien | Frühe Spuren von *Homo sapiens*  
Beringbrücke | Der eisige Weg

HIER DOWNLOADEN

FÜR NUR  
€ 4,99

KLIMAMANIPULATION

# Rettet uns das. Geoengineering?

von Christopher Schrader

Die Erderwärmung schreitet voran. Aber die Menschheit tut sich mit dem Umbau der Energieerzeugung weiter schwer. Müssen wir aktiv das Klima manipulieren?

**D**ie Welt ist eine Badewanne, sagen manche Klimafor- scher. Jedes Jahr schütten wir 40 Liter Wasser hinein, bald läuft sie über, und wir wissen nicht, wie wir das verhindern sol- len. Denn die Wanne in der Metapher hat weder Ab- noch Überlauf, und ob die Menschheit schöpfen oder pumpen soll oder ob irgendwelche Hightech-Verfahren helfen könnten, das weiß zurzeit niemand.

Die Wanne in der Metapher ist die At- mosphäre, die jedes Jahr etwa 40 Milliar- den Tonnen Kohlendioxid aus Schornstei- nen und Auspuffen aufnimmt. Zwar ver- langen die ehrgeizigen Ziele der internationalen Klimadiplomatie, diese Entwicklung zu stoppen, aber in der realen Politik passiert dafür nicht genug. Darum denken viele Experten inzwischen über verzweifelte Maßnahmen nach. Könnte man die Erde notfalls künstlich kühlen, in- dem man das Sonnenlicht abschirmt? Könnte man einen Teil der Treibhausgase, besonders das CO<sub>2</sub>, mit technischen Anla- gen aus der Atmosphäre saugen?

Zumindest mit der Funktion möglicher Gegenmaßnahmen sollte man sich wohl einmal beschäftigen, davon ist zum Bei-

spiel Sabine Fuss vom Mercator-Institut für globale Gemeingüter und Klimawan- del (MCC) in Berlin überzeugt. »Die Welt muss die Emissionen schnellstmöglich stoppen, und uns läuft die Zeit davon.«

Zusammenfassend heißen solche Ideen Geoengineering. Zurzeit werden mehr als ein Dutzend Verfahren in drei Kategorien diskutiert.

- **Natürliche Maßnahmen:** Die Erde selbst soll der Atmosphäre wieder mehr Koh- lendioxid entnehmen und im Boden spei- chern. Das ließe sich erreichen durch das Aufforsten von Wäldern, das Renaturie- ren von Feuchtgebieten sowie landwirt- schaftliche Praktiken, die Kohlenstoff im Boden halten. Zum Beispiel verkündet die Initiative »4 Promille«, die Mensc- heit könne den Anstieg der CO<sub>2</sub>-Belas- tung stoppen, wenn zum Beispiel mehr Hülsenfrüchte und Zwischensaaten an- gebaut würden und mehr Grasstreifen und Hecken stehen blieben.
- **Carbon Dioxide Removal (CDR):** techni- sche Verfahren, Kohlendioxid und ande- re Treibhausgase wieder aus der Atmo- sphäre zu holen. Dazu zählt unter ande- rem die Idee, CO<sub>2</sub> aus dem Abgas von

Biomassekraftwerken oder einfach aus der Luft zu saugen. Andere Forscher wol- len Gestein zermahlen und verstreuen, so dass die Brösel das Treibhausgas che- misch binden. Diese ersten beiden gro- ßen Kategorien werden seit einiger Zeit auch unter dem Begriff negative Emis- sions-Technologien (NET) zusammenge- fasst.

- **Solar Radiation Management (SRM):** Ein- griffe in den Strahlungshaushalt der Erde. Unter dem Stichwort geht es zum Bei- spiel um das Versprühen von Schwefel- säure in der Stratosphäre. Dafür gibt es ein natürliches Vorbild: Vulkane stoßen bei Eruptionen sehr viel davon aus und können so tatsächlich die Erde abkühlen. 1991 senkte der Ausbruch des Pinatubo die globalen Durchschnittstemperaturen um ein halbes Grad Celsius. In diese Kate- gorie gehören auch das Aufhellen von Wolken oder Spiegel im Orbit, die beide Licht und Wärme von der Sonne ins All zurückschicken.

### **Das Entsetzen ist meist groß**

Wer sich mit diesen Ideen näher beschäf- tigt, ist oft entsetzt. Silke Beck vom Helm- holtz-Zentrum für Umweltforschung in

Leipzig urteilt zum Beispiel: »Bei den negativen Emissionen handelt es sich um eine hochriskante Wette auf die Zukunft.« Dennoch geht es in der Debatte in der Wissenschaft zunehmend nicht mehr um die Frage, ob solche Eingriffe nötig werden, sondern wann. Für viele wirkt etwa das großtechnische Entnehmen von CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre heute schon realistischer als ein baldiges Ende der Kohleverstromung.

Einen gewaltigen Motivationsschub hat dabei das Pariser Abkommen mit seiner Forderung ausgelöst, die Erwärmung der Welt auf »deutlich unter zwei Grad Celsius« oder besser noch auf 1,5 Grad Celsius zu begrenzen. »Fast alle Szenarien, die dieses ehrgeizige Ziel verfolgen und Weg dahin aufzeigen wollen, nutzen in großem Umfang negative Emissionen«, sagt Mark Lawrence vom Institut für transformative Nachhaltigkeitsforschung (IASS) in Potsdam. »Meist fängt der Einsatz der Technologie in den Modellen schon ab 2020 an, damit etwa 2050 bis 2070 die gesamten Emissionen netto negativ werden.« Spätestens dann also sollen die neuen Verfahren mehr Treibhausgas aus der Atmosphäre entnehmen, als die dann verbleibenden,

unvermeidlichen Quellen in Industrie und Landwirtschaft freisetzen.

Vor diesem Hintergrund beschäftigt sich unter anderem der Weltklimarat IPCC in seinem für den kommenden Herbst erwarteten Sonderbericht zur 1,5-Grad-Grenze ausführlich mit Geoengineering. In einem vor Kurzem geleakten Entwurf des vertraulichen Reports zeigt sich das Gremium skeptisch, ob die Erwärmung tatsächlich und sicher bei 1,5 Grad gestoppt werden kann. Für den Report lag demnach überhaupt kein Szenario mehr vor, das ohne das Entfernen von CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre auskommt. Doch ob sich die NET-Verfahren im angenommenen Umfang realisieren lassen, ist laut dem Entwurf erheblich zu bezweifeln. Nach dessen Bekanntwerden hat der Weltklimarat allerdings gewarnt, viele Schlussfolgerungen darin könnten sich noch ändern.

### **Magisches Denken**

Immerhin entspricht der Tenor des IPCC-Urteils der Einschätzung anderer Experten: Ein Kommentar im Fachblatt »Nature« nannte das Vertrauen auf NET vor Kurzem »magisches Denken«. Auch der Wissenschaftsrat der Europäischen Akade-

mien (EASAC) kritisiert Ideen zu negativen Emissionen in einem Bericht aus dem Februar 2018. Sie hätten nur ein »begrenzt realistisches Potenzial, Kohlenstoff aus der Atmosphäre zu entfernen«, heißt es darin. Oft werde zwar mit ihrem ungeheuren technischen Potenzial argumentiert, das sich aus naiven Hochrechnungen ergibt. Tatsächlich aber reichten die Verfahren keinesfalls aus, um so viel Kohlendioxid aus der Atmosphäre zu entfernen, wie Modellannahmen bisher voraussetzen. Dennoch stellen die EASAC-Forscher in ihrem Bericht gleich mehrmals fest: »Die Menschheit wird alle möglichen Werkzeuge brauchen, um die Erwärmung innerhalb der Grenzen des Pariser Abkommens zu halten.«

Allerdings sind die diskutierten Größenordnungen Furcht einflößend. Es geht um 600 oder 1000 Milliarden Tonnen in der zweiten Hälfte des Jahrhunderts. Schon 2030 müssten nach der Annahme vieler Modelle fünf Milliarden Tonnen erreicht sein – das wären umgerechnet ungefähr 160 Kilogramm pro Sekunde.

Das zurzeit am meisten diskutierte der Verfahren heißt BECCS (Bioenergy with Carbon Capture and Storage). Es sieht vor,

große Plantagen mit Bäumen oder anderen Energiepflanzen anzulegen, diese nach der Ernte zur Energiezeugung zu verbrennen, dabei das entstehende CO<sub>2</sub> aufzufangen und unter die Erde zu pressen. Das stellt eine Entnahme aus der Atmosphäre dar, weil die Pflanzen das Kohlendioxid bei ihrem Wachstum gebunden haben und ein großer Teil davon nicht wieder freigesetzt wird. Viele Forscher haben sich mit den Grenzen und extremen Folgen dieser Idee beschäftigt. Um damit zum Beispiel erst bei deutlichen Krisenzeichen im Jahr 2050, vor dem Hintergrund eines zu langsam sinkenden Treibhausgasausstoßes schnell die nötigen »negativen Emissionen« zu erzeugen, müsste die Größenordnung von einem Viertel der globalen Ackerfläche dafür verwendet werden, zeigen Modellrechnungen eines Teams um Lena Boysen vom Max-Planck-Institut für Meteorologie in Hamburg – meist sogar das beste Land. Engpässe bei der Ernährung wären wohl die Folge.

### **Immenser Landverbrauch**

Ein anderes extremes Szenario sieht vor, die Felder nicht anzutasten, sondern zusätzliche Flächen für Plantagen freizuräu-

men. Sie würden dann bis zu 800 Millionen Hektar einnehmen, also etwas mehr als die Hälfte der bisherigen Äcker. Auf maximalen Ertrag getrimmt, könnten die Pflanzungen mehr Wasser verbrauchen als bisher alle Anbaugelände der Welt zusammen, stellt ein Team um Vera Heck vom Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung in »Nature Climate Change« fest. Allerdings würde man damit wohl neue Gefahren für die Natur und Biodiversität heraufbeschwören: »Es gibt heute kaum noch Regionen, in denen der menschliche Einfluss so gering ist, dass man noch Raum hätte für die zusätzliche Landnutzung in Form von Bioenergieplantagen«, sagt Heck.

Eine weitere Idee ist, CO<sub>2</sub> einfach aus der Luft zu entnehmen. Die schweizerische Firma Climeworks betreibt bereits in Hinwil bei Zürich sowie in Hellisheidi auf Island solche Anlagen, auch ein US-Unternehmen arbeitet mit der Technik. Diese sogenannte Direct Air Capture (DAC) braucht allerdings gewaltige Mengen Energie, und wenn diese nicht treibhausgasfrei erzeugt wird, nützt der ganze Aufwand wenig. Das Verfahren setzt zudem genau wie BECCS voraus, dass es bereits Speichermöglich-

keiten gibt. In Island drückt Climeworks das aufgefangene CO<sub>2</sub> probeweise per Wasserstrahl unter die Erde in eine Basaltschicht, wo sich der Kohlenstoff chemisch binden soll.

Auf solche Speicher könnte verzichten, wer Gesteinsbrösel in der Landschaft oder auf dem Meer verstreut. Fein gemahlene Mineralien gehen mit CO<sub>2</sub> chemische Verbindungen ein und halten es so fest – es ist, als würde man den isländischen Basalt nach oben bringen und verteilen. Allerdings sind gewaltige Mengen zerkleinerter Fels notwendig: jeweils drei Tonnen für eine Tonne Kohlendioxid, die entfernt werden soll, stellen die EA-SAC-Forscher fest. Das beliefe sich auf viele Milliarden Tonnen Jahr für Jahr. Halbe Gebirge müssten abgetragen, die Produktionsmengen zum Beispiel von Olivin oder Kalk um Faktoren von 100 und 1000 erhöht werden. Auch hier wäre der Energiebedarf gewaltig – genau wie die Kosten, wie eine Studie mit Autoren aus Potsdam und Hamburg in »Environmental Research Letters« feststellt: Eine Milliarde Tonnen CO<sub>2</sub> mit den Mineralien Dunit oder Basalt zu binden, könnte 60 bis 200 Milliarden Dollar kosten.



Nicht einmal die so genannten natürlichen Maßnahmen können ihre angenommenen Beiträge zur Stabilisierung sicher liefern. Zwar klingt Aufforsten oft wie eine durch und durch positive Maßnahme – bis Zahlen auf den Tisch kommen. So rechnet eine aktuelle Studie von US-Wissenschaftlern vor, man müsse 500 000 Quadratkilometer amerikanischer Landschaft (das ist die anderthalbfache Fläche Deutschlands) aufforsten, um ein Prozent der Emissionen der Nation binden zu können. Auch an den Rechenergebnissen der Vier-Promille-Initiative üben Fachwissenschaftler Kritik. Jahr für Jahr den Kohlenstoffgehalt im Boden weiter zu steigern, halten viele für unmöglich. Auch britische Forscher zeigen sich nach – teilweise erfolgreichen – Langzeit-Experimenten im englischen Rothamsted Research Centre trotzdem skeptisch.

### **HOLZPLANTAGE**

**Eine Möglichkeit, die Klimaerwärmung zumindest einzudämmen, wären riesige Baumplantagen. Das Kohlendioxid würde aktiv der Atmosphäre entzogen und im Holz zwischengespeichert werden. Der Landverbrauch wäre aber gewaltig.**

## Ein Einstieg?

Dennoch wirken gerade solche Ansätze vielleicht als Einstieg in die absichtliche Manipulation des Klimas, vermutet Oliver Geden von der Stiftung Wissenschaft und Politik in Berlin. »Sie erscheinen als so genannte No-Regrets-Maßnahmen, die also auf jeden Fall einen positiven Effekt haben. Vielleicht ändern sie langsam das Image der negativen Emissionen.« Bisher lähmen die Blicke in die Zukunft die Diskussion nämlich. »Wenn davon die Rede ist, dass wir im Lauf des Jahrhunderts 600 oder mehr Milliarden Tonnen CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre entnehmen müssen, führt das zu solchen absurden Ideen wie den Plantagen von der Größe ganzer Kontinente. Und dann ist die Diskussion gleich wieder vorbei. Aber es geht doch nicht um alles oder nichts. Und niemand sagt, dass alles mit einem Verfahren gemacht werden soll.«

Diesen Punkt unterstreicht die MCC-Forscherin Sabine Fuss. Es gehe darum, »ein Portfolio von möglichen Verfahren zu entwickeln. Dann kann man die möglichen negativen Folgen einzelner Techniken vermutlich beherrschen.« Andere Beobachter indes befürchten, dass die Menschheit auf eine schiefe Ebene gerät: Nach den natürli-

chen Klimälösungen kommen die Techniken der negativen Emissionen zum Einsatz, und dann – wenn das immer noch nicht reicht, den Klimawandel zu stoppen – werden womöglich die Verfahren zum Eingriff in den Strahlungshaushalt attraktiv.

Bisher existieren die Verfahren des Solar Radiation Management noch weitgehend als Gedankenspiele, wenn auch als sehr weitreichende: Manche Wissenschaftler haben schon kalkuliert, was für eine Flotte von Flugzeugen nötig wäre, um mit 6700 Starts pro Tag genügend Schwefelpartikel in der Atmosphäre zu verteilen. Andere machen konkrete Pläne, in drei Jahren das Eis der arktischen Framstraße zwischen Spitzbergen und Grönland mit winzigen Glaskügelchen zu bestreuen, die Sonnenlicht reflektieren und das Abschmelzen bremsen. Und eine dritte Gruppe rechnet schon mit einer Armada von autonomen Schiffen, die Tröpfchen von Meerwasser aufwirbeln und so die Wolken aufhellen.

Was überwiegend fehlt, sind konkrete Experimente. Lediglich das Team von ICE911, das die Glaskügelchen in der Arktis verstreuen will, hat sein Material schon einmal im Norden Alaskas getestet. Doch noch im kommenden Frühjahr könnte ein

spektakulärer Versuch beginnen. Dann möchten David Keith und sein Team von der Harvard University in Arizona einen Ballon starten lassen und zum ersten Mal Partikel in der Atmosphäre freisetzen. Unter dem Experimentnamen »Scopex« versprüht der Apparat zuerst Wasserdampf, aus dem sich in 20 Kilometer Höhe sofort Eiskristalle bilden. Später folgen Versuche mit Kalziumkarbonat oder Schwefelsäure. Der Ballon soll die Partikel erst ausstoßen und dann durch die von ihm erzeugte Wolke kreuzen, um die Verbreitung zu erfassen. Insgesamt gehe es anfangs um Mengen von einigen Kilogramm Wasserdampf und etwa 100 Gramm Schwefel oder Kalzit. Das Material werde deutlich weniger Effekt haben als die Eisenspäne, die der Ballon wie immer bei Experimenten in der Stratosphäre zur Höhenregulierung ausstößt, betont der Physiker.

## Scharfe Kritik

Nicht alle Fachleute sehen das Vorhaben als harmlos. »Wenn die Gruppe um David Keith demnächst ein Freisetzungsexperiment in der Atmosphäre macht, wird eine rote Linie überschritten«, warnt Lili Fuhr von der Heinrich-Böll-Stiftung, die in dem

Punkt für eine breite Koalition von politischen Gruppen spricht. Vermeintliche Sachzwänge, die Geoengineering unvermeidlich machten, will sie nicht gelten lassen, solange zum Beispiel in vielen Ländern der Verbrauch von Kohle oder Öl auch noch subventioniert wird. In jedem Fall sollte gesellschaftlich breit über Risiken und Gefahren des Geoengineering diskutiert werden, bevor durch Experimente bereits Fakten geschaffen werden. Dem stimmt David Keith sogar im Prinzip zu: »Es ist gut möglich, dass die Kritiker sich am Ende einer gesellschaftlichen Diskussion durchsetzen. Dass es den Beschluss gibt, Forschung wie meine zu stoppen. Aber das jetzt schon an einem kleinen Experiment aufzuhängen, verleiht ihm zu viel Gewicht.«

Der Harvard-Forscher ist sich allerdings der naheliegenden politischen Gefahr bewusst, wenn er vermeintlich einfachere Lösungen erkundet. »Manche Leute werden übertreiben, wie effektiv die Technik sein kann, und dann argumentieren, dass wir nicht mehr so viel für die Reduzierung der Emissionen tun müssen«, sagt er. »Richtig ist aber: Wir müssen die Emissionen irgendwann bald auf null reduzieren, ganz

egal, ob wir Solar Radiation Management nutzen oder nicht.«

Mindestens in diesem Punkt sind sich die Experten einig: Welche von den Ideen des Geoengineering auch immer eines Tages Wirklichkeit werden, die Maßnahmen dürfen nur zusätzlich zum Abbau von Treibhausgas-Emissionen ergriffen, nicht mit ihnen verrechnet werden. Und: Die Zeit drängt. »Uns bleibt vermutlich nur noch dieses Jahrzehnt für eine deutliche Reduktion des Ausstoßes«, mahnt Mark Lawrence von IASS in Potsdam. »Sonst schaffen wir ohne Geoengineering nicht mehr die Pariser Temperaturziele.« ↩

(Spektrum – Die Woche, 12/2018)



Spektrum  
der Wissenschaft

KOMPAKT

# CHRONO- BIOLOGIE

Unser innerer Rhythmus

Synchronisation | Feine Abstimmung  
Zirkadiane Rhythmen | Unordnung ist ungesund  
Wochenstart | Der Montagsblues

HIER DOWNLOADEN

FÜR NUR  
€ 4,99

KOHLNSTOFFEINLAGERUNG

# Ab in den Untergrund

von Christopher Schrader

Kohlendioxid einfangen und in Gestein endlagern – das hört sich verlockend an. Doch über mehr als kleine Versuchsstadien ist man bislang nicht hinausgekommen.



**D**ie Boundary Dam Power Station trägt die Kraft des Wassers nur im Namen – tatsächlich verbrennt das Elektrizitätswerk in Estevan, Kanada, Braunkohle. Vier eher kleine Blöcke hat die Anlage; der jüngste wurde erst 2013 installiert und ist auf seine Art weltberühmt: als erster kommerzieller Kohlemeiler, aus dessen Abgasen das Kohlendioxid fast komplett ausgewaschen und unter die Erde gepresst wird. 1920343 Tonnen CO<sub>2</sub>, vermeldet der Betreiber Sask-power Anfang Februar 2018 stolz, habe Unit #3 seit der Inbetriebnahme aus der Atmosphäre ferngehalten. Weltweit gibt es nur noch ein weiteres Kohlekraftwerk, das 2017 eröffnete Petra Nova bei Houston in Texas, das ähnlich arbeitet. Einige weitere sind in China im Bau.

Das Verfahren wird allgemein mit den Buchstaben CCS abgekürzt; sie stehen für Carbon Capture and Storage, also das Auffangen und Speichern von Kohlendioxid. Es kommt im Prinzip überall dort in Frage, wo CO<sub>2</sub> in großen Mengen konzentriert anfällt, bei Verbrennungsprozessen, der Herstellung von Bioalkohol oder Düngemitteln sowie in der Petrochemie. Technisch

ist es kaum ein Problem, das Treibhausgas abzutrennen, zu reinigen, zu konzentrieren und zu komprimieren. Als Flüssigkeit fließt es dann durch Pipelines und wird schließlich tief unter die Erde gepresst, zum Beispiel in Salzwasserlagen oder in ausgebeuteten Erdgasfeldern, an Land oder unter dem Meeresboden. Mit Letzterem haben vor allem die Norweger viel Erfahrung, die im Feld Sleipner in der Nordsee bereits etwa 17 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub> entsorgt haben.

Wie das Verfahren allerdings zu bewerten ist, darüber wird seit Langem gestritten. Seinen Gegnern gilt es als grüne Fassade der Kohleindustrie, sie haben zum Beispiel in Deutschland fast alle Pilotversuche verhindert. Seine Anhänger hingegen loben CCS über den grünen Klee. »Ohne CCS ist es unmöglich, die europäischen oder globalen Ziele einer CO<sub>2</sub>-Reduktion zu erreichen«, verkündet zum Beispiel die Zero Emissions Platform, ein europäischer Zusammenschluss von Firmen und Regierungsorganisationen. Lord Nicholas Stern, Klimaökonom an der London School of Economics, hält CCS sogar für »absolut notwendig«. Hinzu kommt, dass viele Klimaforscher inzwischen erklären, die Welt

müsse in den kommenden Jahrzehnten große Mengen CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre entnehmen. Und irgendwo muss das Treibhausgas danach ja hin.

### **Verflogene Euphorie**

Gemessen an diesen Ansprüchen passiert mit CCS allerdings ziemlich wenig. So hatte zum Beispiel die Europäische Union 2007 ein ehrgeiziges Programm beschlossen, das bis 2015 ein Dutzend Demonstrationsprojekte vorsah. Etwa 600 Millionen Euro hat die EU seither ausgegeben, ohne etwas Vorzeigbares zu bekommen. Als letztes Vorhaben wurde im Sommer 2017 die Planung des Kohlekraftwerks ROAD in den Niederlanden eingestellt. Ein spanisches Projekt hatte bis 2013 sämtliche Fördergelder eingestrichen und wurde dann selbst gestrichen. Auch in Deutschland scheiterten Vorhaben: So sollten ein Braunkohlekraftwerk in Brandenburg sowie der Steinkohlemeiler Moorburg in Hamburg mit CCS ausgerüstet werden. Das Kraftwerk wurde nicht gebaut, der Meiler ging ohne die Technik zum Auffangen von CO<sub>2</sub> ans Netz.

Der zentrale Grund ist in jedem Fall: CCS ist teuer. Solange das Freisetzen von CO<sub>2</sub> fast nichts kostet – in der EU werden die

Emissionszertifikate zurzeit für zehn Euro pro Tonne gehandelt, lagen aber lange bei fünf –, lohnt es sich betriebswirtschaftlich nicht, die Abgase zu behandeln. Die Betreiber von Kraftwerken oder anderen Industrieanlagen müssten eine Perspektive über 30 Jahre bekommen, dass sich ihre Investition in die Abgasreinigung auszahlt oder unvermeidlich ist. Solche Signale sendet die Politik zurzeit nirgendwo. Nicht einmal Norwegen kommt voran, das in der Entsorgung von CO<sub>2</sub> ein Geschäftsmodell für die Zeit sieht, in der die Erdgasförderung nichts mehr einbringt. Dort hat die Regierung vor Kurzem im Haushaltsentwurf einem ehrgeizigen Demonstrationsprojekt den Geldhahn zugedreht.

Vor diesem Hintergrund sollte man die neuesten Ankündigungen vorsichtig interpretieren. So hat offenbar die niederländische Koalitionsregierung beschlossen, bis 2030 die Emissionen des Landes um 56 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub> zu senken; 18 Millionen Tonnen davon sollen mit Hilfe von CCS irgendwo unter der Nordsee in die Tiefe gepresst werden. Der Hafen Rotterdam bereitet sich trotz des Aus für das ROAD-Kraftwerk weiter darauf vor, groß in das Geschäft mit Kohlendioxid einzusteigen, das

Treibhausgas zwischenzuspeichern und in eine Pipeline gen Meer einzuspeisen.

### **Finanzielle Anreize**

Mit großer Hoffnung blickt die CCS-Gemeinde außerdem auf die Steuergesetzgebung der USA, wo ein Entwurf Abschreibungen für das Auffangen und Speichern von CO<sub>2</sub> vorsieht. So sollen Firmen die Überweisung ans Finanzamt um 50 US-Dollar für jede Tonne mindern können, die sie unter die Erde pressen. Das ist zwar nicht Kosten deckend, analysiert der »MIT Technology Review«, könnte der Technologie aber zusammen mit anderen Subventionen über die Schwelle zur Wirtschaftlichkeit helfen.

Schon heute liegen neun der insgesamt 17 Projekte, die die Lobbygruppe Global CCS Institute in ihrem Statusbericht aufzählt, in den USA. Neben dem neuen Petra-Nova-Kraftwerk sind es vor allem Betriebe, die Dünger, Ethanol oder Wasserstoff produzieren. Dazu kommen vier Firmen, die CO<sub>2</sub> aus gerade gefördertem Erdgas abtrennen, um den Brennstoff auf den Markt zu bringen. Nur in einem Fall aber wird das Kohlendioxid tatsächlich allein zu dem Zweck unter die Erde gedrückt, es dort los-

zuwerden. Die anderen acht Pioniere verkaufen das Treibhausgas an die Betreiber von alternden Ölfeldern, die damit ihre Produktion verbessern.

Wie wenig diese Technik der Enhanced Oil Recovery (verbesserte Ölausbeute) tatsächlich mit Speichern von Treibhausgas zu tun hat, zeigt auch die kanadische Boundary Dam Power Station. Von dort fließt das CO<sub>2</sub> gut 60 Kilometer weit durch eine Pipeline in die Nachbarprovinz Alberta, um das letzte Öl aus dem dortigen Weyburnfeld zu drücken. In der Summe ist das allerdings ein schlechtes Geschäft für die Atmosphäre, wie die Analyse einer Umweltgruppe belegt: Jede der etwa eine Million Tonnen Kohlendioxid pro Jahr, stellt der Bericht fest, bedeutet für die Ölfeldbetreiber ein Produktionsplus von ungefähr 2,5 Barrel Erdöl. Mit dem Rohstoff kommen ungefähr 300 Kilogramm des CO<sub>2</sub> wieder nach oben und entweichen, nur 700 Kilogramm werden tatsächlich in der Tiefe gebunden. Aus dem Öl wiederum werden später Kraftstoffe, und wenn diese irgendwo verbrannt werden, entstehen weitere etwa 1,3 Tonnen Kohlendioxid. Wo also aus dem unbehandelten Abgas des Blocks 3 eine Tonne des Treibhausgases in die At-

mosphäre gelangt wäre, finden nun 1,6 Tonnen CO<sub>2</sub> den Weg ins Freie.

### **Gewaltige Kapazitäten**

Solche unangenehmen Zahlen können die Betreiber von CCS-Anlagen nur dann vermeiden, wenn sie das Kohlendioxid tatsächlich nur zur Entsorgung unter die Erde drücken. Geeignet dafür sind neben Salzwasserschichten (saline Aquifere) auch ausgebeutete Öl- und Gasfelder, aus denen die Besitzer wirklich nichts mehr herauspressen können oder wollen. Die Kapazität solcher Lagerstätten ist offenbar gewaltig; allein im britischen Teil der Nordsee könnte man mehr als 100 Jahre lang CO<sub>2</sub> verpressen, erklärt die norwegische Nichtregierungsorganisation Bellona.

Dennoch müssen die Vertreter der Technik noch viel werben, selbst wenn sich CCS demnächst zu einem guten Geschäft entwickeln sollte. In vielen Teilen Europas hat der Widerstand von Bürgerinitiativen und Aktivisten schließlich selbst Pilotprojekte verhindert. Zurzeit ruht die politische Debatte über das Thema weitgehend, doch die Gegner würden sich schnell wieder melden, wenn das Abscheiden und Speichern von Kohlendioxid wie-

der auf die Tagesordnung käme. Und das wird es, ist sich zum Beispiel Lili Fuhr von der Heinrich-Böll-Stiftung sicher, die den ganzen Komplex von Geoengineering und CCS kritisch beobachtet. »Es gibt ein massives Interesse der traditionellen Energiekonzerne, die CCS-Technologie voranzubringen«, sagt sie. »Sie könnten damit ihre teilweise bereits abgeschriebenen Anlagen und Felder Gewinn bringend weiternutzen.«

»CCS hat in Deutschland vermutlich weniger Anhänger als die Atomenergie«, bestätigt Oliver Geden von der Stiftung Wissenschaft und Politik in Berlin. »Auch Politiker scheuen davor zurück, sich für die Technik einzusetzen, weil sie den zentralen Narrativen der Energiewende von sauberer und dezentraler neuer Technik zuwiderläuft.« Windräder und Solarmodule sind hier zu Lande zu den Symbolen des Kampfs gegen den Klimawandel geworden. Anlagen zum Auffangen und Verpressen von Treibhausgas hingegen haben viel Ähnlichkeit mit der bisherigen zentralisierten Energieinfrastruktur mit ihren großen Kraftwerken, Fabriken und Pipelines. Damit lässt sich gut Stimmung machen und Widerstand organisieren.

Umfragen zum Thema zeigen allerdings vor allem, dass viele Menschen kaum etwas über das CCS-Verfahren, seine Ziele und Randbedingungen wissen. Der erbitterte Kampf vor einigen Jahren hat wenig Spuren hinterlassen. Oft gibt es darum eine vage positive Reaktion auf die Idee. In einer repräsentativen deutschen Studie äußerten sich die Befragten zudem etwas freundlicher zum Abfangen von CO<sub>2</sub> aus Industriebetrieben oder einem Kraftwerk, das Biomasse verfeuert, als wenn die Abgase aus einem Kohlemeiler kämen. Groß und wirklich tragfähig war der Unterschied zwar nicht, dennoch könnten die CCS-Freunde versuchen, darauf aufzubauen.

Gerade wenn es in Zukunft darum geht, den Klimawandel dort aktiv zu bekämpfen, wo nichts anderes hilft, könnte der Widerstand abnehmen, spekuliert Oliver Geden. »Die bisherige Ablehnung von CCS in Deutschland ändert sich vielleicht langsam, wenn tatsächlich Treibhausgase aus der Luft entnommen werden. Bei der Diskussion über so etwas wie die Direct Air Capture und mit einem Speicherort irgendwo vor der Küste entwickelt sich vielleicht auch hier zu Lande eine Art permissive Toleranz.«

Für Klimaforscher ist das dringend notwendig. Viele von ihnen suchen intensiv nach Auswegen aus der Krise und lassen Computermodelle berechnen, ob und wie die Welt die Ziele des Pariser Vertrags einhalten kann. Oft setzen die Wissenschaftler dabei einfach voraus, dass es in den kommenden Jahrzehnten eine einsatzbereite CCS-Infrastruktur gibt. Wo diese Bedingung nicht erfüllt ist, etwa weil die Gesellschaften reicher Industrieländer die Technologie blockieren, da finden gelegentlich auch die Computer keinen Pfad zum Ziel mehr. ↩

(Spektrum – Die Woche, 11/2018)

# EPIGENETIK

Prägende Eindrücke im Erbgut



Traumata | Geerbte Erfahrungen  
Umweltgifte | Schäden an mehreren Generationen  
Evolution | Der Ursprung der Instinkte

HIER DOWNLOADEN

FÜR NUR  
€ 4,99

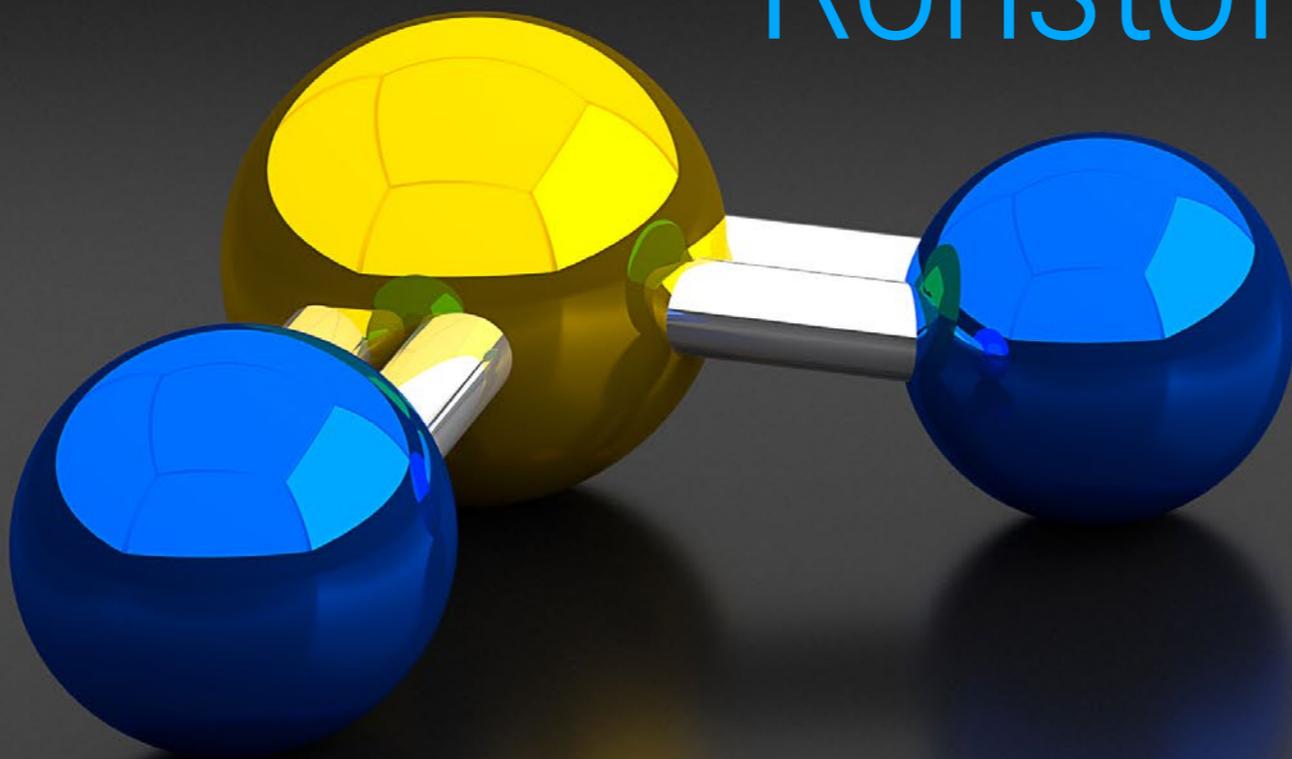


# Rohstoff **Kohlendioxid**

TREIBHAUSGAS-RECYCLING

von Lars Fischer

Aus Kohlendioxid kann man Benzin, Plastik oder Düngemittel herstellen – im Prinzip jedenfalls. In der Praxis ist das alles nicht ganz so einfach.



**W**as die Natur kann, das kann die Chemie auch – und wahrscheinlich sogar besser. Das ist die Botschaft des niederländischen Chemikers Bernard Feringa von der Universität Groningen. Der Nobelpreisträger von 2016 propagiert einen technischen Ansatz gegen den Klimawandel, in seiner Argumentation einfach eines der größten Abfallprobleme der Menschheit.

Entsprechend lautet sein Ansatz: Recycling. Das Treibhausgas Kohlendioxid könne man der Atmosphäre entziehen und den Kohlenstoff darin wieder in Kraftstoffe oder gar wertvolle Chemikalien umwandeln, argumentierte Feringa am 26. Juni 2017 im Rahmen der Lindauer Nobelpreisträgertagung, die alljährlich am Bodensee stattfindet. »Die CO<sub>2</sub>-Fixierung durch Pflanzen ist vermutlich der größte chemische Prozess der Welt. Im Prinzip müssen wir das auch hinbekommen.«

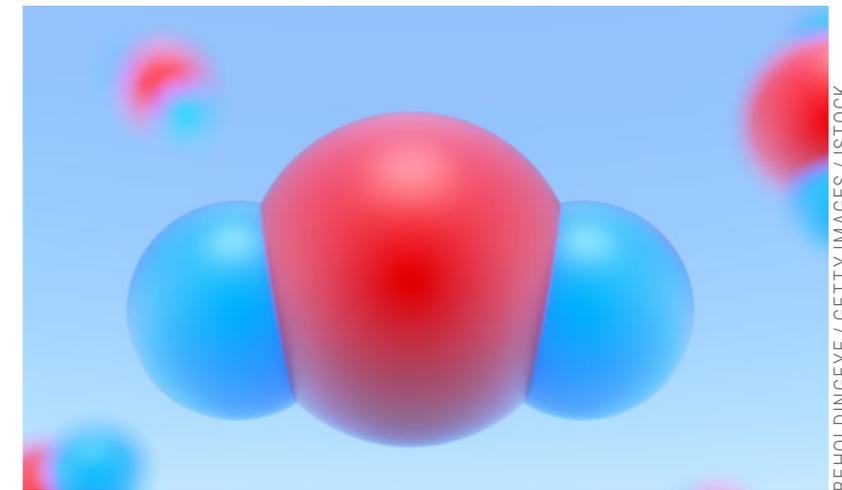
Die Hindernisse auf dem Weg dorthin sind allerdings erheblich, sowohl ökonomisch und gesellschaftlich als auch chemisch. Der Nobelpreisträger ist schließlich nicht der Erste, der auf diese naheliegende

Idee kommt. Im Gegenteil, schon in den 70er Jahren des 20. Jahrhunderts begannen die Versuche, das Molekül, das bei Verbrennungsvorgängen reichlich anfällt, als Rohstoff zu verwenden. Auf dem Höhepunkt des Atomzeitalters gab es Pläne, die überschüssige Leistung der Kernreaktoren in die Spaltung von Kohlendioxid zu investieren, um Kerosin zu gewinnen.

### **Unerwünschte Stabilität**

Diese Idee ließ man später fallen, doch auch heute noch ist der enorme Energiebedarf eine wichtige Hürde für das Kohlendioxid-Recycling. »Das Problem ist die hohe Stabilität des Moleküls. Die C-O-Doppelbindung ist eine der stabilsten Bindungen, die man in der organischen Chemie kennt«, sagt Anna Eibel, Doktorandin an der TU Graz. »Man braucht deswegen sehr viel Energie und einen effektiven Katalysator.« Eibel diskutierte in Lindau zusammen mit Feringa Wege, das Kohlendioxid mit chemischen Verfahren wiederzuverwenden.

Im Zentrum des Interesses steht dabei die Vorstellung, dereinst Kraftstoffe aus dem Kohlendioxid der Atmosphäre herzustellen, zum Beispiel Methanol, das bei der Reaktion von Kohlendioxid und Wasser-



»Aus CO<sub>2</sub> etwas Nützliches zu machen, ist eine sehr schwierige Aufgabe. Aber ich bin überzeugt, dass wir es schaffen können«

[Bernard Feringa]

stoff entsteht. Damit könnte man Autos, Flugzeugen und nicht zuletzt Nutzfahrzeugen ihren flüssigen Sprit erhalten, der bisher ungeschlagen in Energiedichte und Handhabbarkeit ist – dann aber eben nicht mehr fossil, sondern komplett erneuerbar. Zusätzlich könnte man solche Prozesse nutzen, um überschüssige elektrische Energie chemisch zu speichern – und so Stromspitzen regenerativer Energien abzufangen.

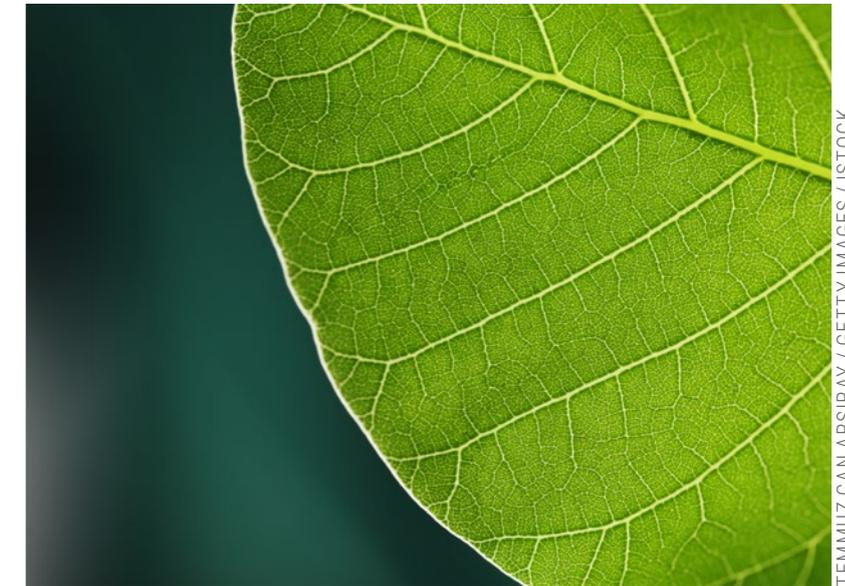
Fachleute warnen jedoch vor zu viel Euphorie. Derartige Anwendungen seien im Prinzip geeignet, einen Beitrag zum Klimaschutz zu leisten, resümiert das Institute for Advanced Sustainability Studies (IASS) im Potsdam in einem Papier von 2015. Allerdings sei das Potenzial des Ansatzes begrenzt, und vor allem könne man nicht automatisch davon ausgehen, dass die Technik tatsächlich treibhausgasneutral sei, erklärt das Institut, dessen Gründung selbst auf einen Appell der Lindauer Nobelpreisträgertagung von 2007 zurückgeht.

Dabei spielt die Quelle des Kohlendioxids eine wesentliche Rolle. Das Treibhausgas aus der Luft abzutrennen, ist wegen seiner geringen Konzentration sehr aufwändig – verlockend dagegen wäre eine

direkte Kopplung der Technik an fossile Kraftwerke, die dann nicht nur Energie, sondern auch Kraftstoff produzierten. Womöglich entstehen dabei technische Abhängigkeiten, die die Laufzeiten von Kohlekraftwerken verlängere, so das IASS. Auf diesem Wege könnte die Technik erneuerbare Energien ausbremsen. Wenn sie denn kommt. Fossile Kraftstoffe sind derzeit schlicht zu billig, als dass das Treibhausgas-Recycling realistisch damit konkurrieren könnte.

### **Wertvolle Chemikalien aus Treibhausgas**

Nobelpreisträger Feringa ist dennoch optimistisch. »Aus CO<sub>2</sub> etwas Nützliches zu machen, ist eine sehr schwierige Aufgabe. Aber ich bin überzeugt, dass wir es schaffen können.« Methanol nämlich ist keineswegs der einzige Stoff, den man aus Kohlendioxid herstellen kann – andere chemische Reaktionen bringen Moleküle hervor, die zum Verbrennen viel zu schade sind. »Es gibt die Möglichkeit, Acrylsäure zu synthetisieren, indem man CO<sub>2</sub> und Ethen reagieren lässt«, erklärt Anna Eibel. »Acrylate sind auch wichtige Stoffe in meiner Forschung.« Acrylsäure ist der Ausgangsstoff für eine ganze Klasse technisch be-



»Der Prozess der Pflanzen ist extrem ineffizient. Jede Solarzelle auf dem Dach wandelt Sonnenlicht zehnmal effektiver in Elektrizität um«

[Bernard Feringa]

deutender Kunststoffe, darunter auch Polymethylmethacrylat, das fast sprichwörtliche »Plexiglas«, Sekundenkleber und synthetisches Gummi.

Daneben gibt es eine Vielzahl grundsätzlich viel versprechender Ideen, wertvolle Produkte aus dem Abfallstoff Kohlendioxid herzustellen – auch für Anwendungen jenseits der Feinchemie. Eibel: »Es ist bekannt, dass man CO<sub>2</sub> mit Ammoniak umsetzen kann, um Harnstoff zu erzeugen, das ist dann wieder für die Düngemittelindustrie interessant.«

Verhindert hat solche Anwendungen bisher vor allem der große Aufwand, den man dafür treiben müsste – und dass es keine geeigneten Katalysatoren gibt: Stoffe, die die Umwandlung beschleunigen, indem sie die Reaktionspartner in geeigneter Weise zusammenbringen. Bisher gibt es da vor allem die Fotosynthese-Maschinerie der Pflanzen – und gerade die macht Bernard Feringa Hoffnung. Denn schon jetzt sei die Technik in gewisser Hinsicht besser: »Der Prozess der Pflanzen ist extrem ineffizient. Jede Solarzelle auf dem Dach wandelt Sonnenlicht zehnmal effektiver in Elektrizität um.«

Deswegen glaubt der Nobelpreisträger auch nicht, dass ein Nachbau der Fotosynthese am Ende das Mittel der Wahl wird. Das sei sehr interessante Grundlagenforschung, die wichtige Erkenntnisse hervorbringe. Aber wenn das technische Kohlendioxid-Recycling im großen Stil Realität wird, dann dank einer längst bewährten Technologie: »Ich denke, die Lösung wird am Ende kein künstliches Blatt sein, sondern ein anorganischer Feststoff – ein robuster Katalysator, von dem man Millionen Tonnen im Jahr herstellen kann.« ↩

(Spektrum – Die Woche, 27/2017)

Spektrum  
der Wissenschaft

KOMPAKT



## NACHHALTIGKEIT

Nahrung und Energie für die Zukunft

Bioenergie | Auf dem Weg in die Maiswüste?

Landwirtschaft | Rettung für Afrikas Erde

Aquakultur | Fischfarmen für eine  
Milliarde Chinesen

HIER DOWNLOADEN

FÜR NUR  
€ 4,99



VON WEGEN ATOMAUSSTIEG

# Kernkraftwerke **der Zukunft**

von Philipp Hummel

Deutschlands nichtnuklearen Sonderweg gehen wohl nur die wenigsten Länder mit. Im Gegenteil, anderswo entwickelt man mit Hochdruck die Atomkraft der nächsten Generation.

**A**n einem idyllischen Fleckchen Erde, zwischen Seen, Flüssen und Wäldern, soll das erste Kernkraftwerk eines neuen Typs entstehen. Je 400 Kilometer von Toronto und Montreal entfernt, nahe den Canadian Nuclear Laboratories, will die Firma Terrestrial Energy einen Prototyp ihres »Integral Molten Salt Reactor«, kurz IMSR, errichten. Der Reaktor, der flüssiges Salz als Kühlmittel verwendet, soll wirtschaftlicher und sicherer arbeiten als heutige Anlagen, verspricht das Start-up. Im November 2017 hat es die erste Hürde im Prüfprozess der kanadischen Behörden genommen.

Weltweit befinden sich derzeit 448 Kernreaktoren in Betrieb. In Deutschland laufen noch acht davon, sie sollen spätestens 2022 abgeschaltet werden. Mit dem Atomausstieg hat die Bundesrepublik allerdings einen Sonderweg in der Energiepolitik eingeschlagen. Denn nicht nur in Kanada sieht es nach einer strahlenden Zukunft für neue Kernkraftwerke aus. Weltweit werden gerade 58 Reaktoren errichtet. 39 davon entstehen in Asien. Luftverschmutzung und Smog in Indien und China gehören zu den Gründen dafür. 70 Prozent des chinesi-

schen Stroms werden aus Kohle erzeugt. Das erste Kernkraftwerk dort wurde erst 1991 in Betrieb genommen. Um das starke Wirtschaftswachstum aufrechtzuerhalten, braucht es neue Stromquellen, die die Luft weniger verschmutzen. Organisationen wie der Weltklimarat IPCC oder die Internationale Energieagentur IEA sehen Kernenergie sogar als möglichen Bestandteil einer globalen Strategie, um die Klimaerwärmung unter das Zwei-Grad-Ziel zu drücken. Denn nachdem sie einmal ans Netz gegangen sind, erzeugen Kernkraftwerke relativ wenig Kohlendioxid, das zum menschengemachten Klimawandel beiträgt.

In Kernreaktoren wird durch die kontrollierte Spaltung schwerer instabiler Atomkerne in einer Kettenreaktion Energie freigesetzt. Die erste kontrollierte Kettenreaktion fand vor 75 Jahren in Chicago in einem Forschungsreaktor statt, den der Physiknobelpreisträger Enrico Fermi entwickelt hatte. In den heute am weitesten verbreiteten Leichtwasserreaktoren werden die schnellen Neutronen, die beim radioaktiven Zerfall des Kernbrennstoffs – meist angereichertes Uran – entstehen, zunächst abgebremst. Das erledigt ein Moderator, beispielsweise Wasser oder Gra-

phit. Die abgebremsten Neutronen haben eine höhere Wahrscheinlichkeit, von einem der schweren Atomkerne eingefangen zu werden und ihn zu spalten. Die dabei entstehenden leichteren Atomkerne tragen die frei werdende Bindungsenergie in Form von Bewegungsenergie davon. Zudem entstehen freie Neutronen, die ihrerseits wieder Kerne spalten, so dass eine Kettenreaktion abläuft, die sich selbst aufrechterhält. Durch die Bewegungsenergie der Spaltprodukte erhitzt sich das Material im Reaktor. Die entstehende Wärme wird durch ein Kühlmittel – häufig Wasser – abgeführt und treibt Turbinen an.

### **Zukunftskraftwerke auf dem Reißbrett**

Man ordnet die Kernreaktionen verschiedenen Generationen zu, an denen man nachvollziehen kann, wie sich die Technik weiterentwickelt hat. Zur Generation I gehören die ersten experimentellen Reaktoren der 1950er und 1960er Jahre. Ab Generation II gelang es ab etwa Mitte der 1960er Jahre, die Anlagen wirtschaftlich als Kraftwerke zu betreiben. Viele der heute in Betrieb befindlichen Anlagen gehören zu dieser zweiten Generation von Kernreaktoren; auch die havarierten Kraftwerke in

Tschernobyl und Fukushima entstammten ihr. Die meisten der heute in Bau befindlichen Kernreaktoren werden als Anlagen der Generation III oder III+ bezeichnet. Generation III beschreibt verbesserte fortschrittliche Leichtwasserreaktoren; Generation III+ basiert auf einem »evolutionären« Sicherheitskonzept, das die Erkenntnisse aus den Stör- und Unfällen der letzten Jahrzehnte in die Nachrüstung bestehender Anlagen und den Bau neuer Reaktoren einfließen lässt.

Um die vierte Generation der Kernreaktoren zu entwickeln und marktreif zu machen, schlossen sich im Jahr 2001 neun Staaten und Institutionen zum Generation IV International Forum (GIF) zusammen: Argentinien, Brasilien, das Vereinigte Königreich, Frankreich, Japan, Kanada, Südafrika, Südkorea und die USA. Mittlerweile sind auch die Schweiz, Russland, China und Australien mit an Bord. Deutschland ist indirekt als Teil der Europäischen Atomgemeinschaft vertreten, die ebenfalls Mitglied des GIF ist.

Nach der Vorstellung des Forums sollen die Anlagen der Generation IV den Brennstoff effizienter nutzen, weniger Atommüll produzieren, wirtschaftlich wettbewerbs-

fähig sein und strenge Standards bezüglich Sicherheit und Verbreitung von waffenfähigem radioaktivem Material erfüllen. Man zielt auf »inhärent sichere« Systeme, die allein durch die Naturgesetze eine Kernschmelze oder andere Störungen und Unfälle passiv vermeiden und nicht auf den aktiven Eingriff durch Mensch oder Technik angewiesen sind. Das GIF hat dafür sechs verschiedene Reaktortypen ins Spiel gebracht, darunter so genannte Brutreaktoren, die mehr Kernbrennstoff produzieren, als sie verbrauchen, und »schnelle Reaktoren«, die keinen Moderator benötigen, um schnelle Neutronen für die Kettenreaktion zu verwenden.

#### **Vier Kandidaten für Generation IV**

Vier der Konzepte haben in den letzten Jahren besonders viel Aufmerksamkeit erfahren, sagt Björn Becker, Ingenieur für Kerntechnik bei der Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS), die den Bund und die Länder berät:

#### **SFR (Sodium-Cooled Fast Reactor)**

Beim »schnellen natriumgekühlten Reaktor« befindet sich der Reaktorkern in einem Becken aus flüssigem Natrium. Er

arbeitet ohne Moderator. Natrium hat verglichen mit Wasser bessere thermodynamische Eigenschaften, weshalb der Reaktor bei höheren Temperaturen und damit höheren Wirkungsgraden betrieben werden kann. Zudem läuft der Reaktorkern bei Atmosphärendruck. Das verspricht theoretisch ein geringeres Unfallrisiko als bei den unter Druck stehenden Leichtwasserreaktoren. Allerdings ist Natrium ein sehr reaktionsfreudiges Element. Die entstehende Wärme wird deshalb in einem Wärmetauscher an einen zweiten Natriumkreislauf abgegeben. So soll bei Lecks kein radioaktives Kühlmittel frei werden. In einem dritten Kreislauf wird dann Wasser verdampft, um eine Dampfturbine anzutreiben. Der SFR könnte als Brutreaktor arbeiten. Dazu könnte auch wiederaufbereiteter Brennstoff aus konventionellen Leichtwasserreaktoren verwendet werden. Der SFR würde dann wie eine Müllverbrennungsanlage funktionieren, die noch dazu neuen Brennstoff erbrütet.

#### **VHTR (Very High Temperature Reactor)**

Beim »Höchsttemperaturreaktor« besteht der Kern aus Graphitkugeln, die im Inneren als Brennstoff kleine Körner aus Uran-

oder Thoriumkeramik enthalten. Das Graphit wirkt als Moderator. Heliumgas führt die entstehende Wärme ab. Es erhitzt sich dabei auf mehr als 1000 Grad Celsius und treibt eine Turbine zur Stromerzeugung an. Das Konzept besitzt einen besonders hohen Wirkungsgrad. Mit zunehmender Temperatur des Reaktors sinkt die Wahrscheinlichkeit der Spaltung der Urkerne. Das führt zu einer bauartbedingten theoretischen Maximaltemperatur des Reaktors. Wenn diese unterhalb des Schmelzpunkts des Reaktormaterials liegt, kann keine Kernschmelze stattfinden. Die große Wärmemenge kann zudem als Prozesswärme verwendet werden, um Wasserstoff herzustellen oder Kohle zu veredeln.

### **LFR (Lead-Cooled Fast Reactor)**

Der »schnelle bleigekühlte Reaktor« wird auch als »nukleare Batterie« bezeichnet. Er verwendet schnelle Neutronen, eine Blei-Bismut-Legierung zur Wärmeabfuhr und kann 15 bis 20 Jahre ohne neuen Brennstoff auskommen. Gekühlt wird der LFR durch natürliche Konvektion. Weil die Brennelemente lange im Reaktor bleiben, erhöht sich die Wahrscheinlichkeit einer Kernspaltung für jedes einzelne Atom. Als

### **ATOMREAKTOR DER GENERATION II**

**Das 1975 in Betrieb genommene belgische Atomkraftwerk Tihange gehört zur Generation II der Kernkraft. Störfälle und rissige Anlagenteile führten dazu, dass das Kraftwerk heutzutage weithin als nicht mehr sicher gilt.**



Arbeitsgas zur Stromerzeugung kommt Kohlendioxid zum Einsatz. Blei und Bismut sind sehr dicht; das höhere Gewicht erfordert stärkere Strukturen, um erdbebensicher zu sein. Die Baukosten sind daher relativ hoch. Wenn die Legierung austritt oder nicht warm genug gehalten wird, verfestigt sie sich, und der Reaktor wird unbrauchbar.

### **MSR (Molten Salt Reactor)**

Flüssigsalzreaktoren lassen sich bei hohen Temperaturen und atmosphärischem Druck betreiben. Das soll sie gegenüber konventionellen Reaktoren sowohl effizienter als auch sicherer bei der Stromerzeugung machen. Die ersten Experimente fanden bereits in den 1950er Jahren im Oak Ridge National Laboratory

EUREGIOCONTENT / STOCK.ADOBE.COM

im US-Bundesstaat Tennessee statt. Doch bis heute ist kein Reaktor dieses Typs ans Netz gebracht worden. Ein Flüssigsalzreaktor besitzt drei Kreisläufe. Im ersten dient eine Salzschnmelze als Kühlmittel. Darin ist der Brennstoff gelöst, der ebenfalls als Salz vorliegt, beispielsweise Uranfluorid. Das flüssige Salz wird durch einen Reaktorkern aus Graphit gepumpt, das als Moderator wirkt. Es kommt zu einer Kettenreaktion, und das Salz erhitzt sich auf fast 800 Grad Celsius. Anschließend fließt das Salz zum ersten Wärmetauscher, der die Wärme an einen zweiten Flüssigsalzkreislauf ohne Brennstoff abgibt. Das soll – wie beim SFR – Gefahren bei Lecks vorbeugen. Es folgt ein dritter Kreislauf, der eine Turbine antreibt. Als inhärente Sicherung befindet sich unter dem Graphitkern ein Ventil, das durchschmilzt, falls das System nicht mehr ausreichend gekühlt wird. Das Salz fließt dann in passiv gekühlte Tanks. Die Flüssigsalze sind erheblich korrosiv, so dass spezielle Metallegierungen für den Bau der MSR verwendet werden müssen.

Bei den beiden verbleibenden der sechs Konzepte des GIF handelt es sich um den »schnellen gasgekühlten Reaktor« GFR

(Gas-Cooled Fast Reactor), der schnelle Neutronen und Helium als Kühlmittel verwendet und bei sehr hohen Temperaturen arbeitet, und den »überkritischen Leichtwasserreaktor« SCWR (Super-Critical Water-Cooled Reactor), der als Kühlmittel und Moderator Wasser unter hohem Druck verwendet, so dass keine Phasenübergänge stattfinden, und der günstig und einfach zu bauen ist. Der GFR und der SCWR sind laut Björn Becker von der GRS in den letzten Jahren ins Hintertreffen geraten. Grundsätzlich sei der Begriff Zukunftstechnologie für die Ideen des GIF mit Vorsicht zu verwenden, erklärt er. Die Konzepte gebe es zum Teil schon seit Jahrzehnten. Ob und welches sich durchsetzen wird und welches am sichersten wäre, lässt sich laut Becker nicht pauschal sagen.

### **Kleine Reaktoren, schlüsselfertig**

Die meisten der in Bau befindlichen Reaktoren erzeugen hohe Leistungen von mehr als einem Gigawatt – genug, um eine Großstadt mit Strom zu versorgen. In den kommenden Jahrzehnten aber könnten kleinere, dezentrale Anlagen an Bedeutung gewinnen, so genannte »Small Modular Reactors« (SMR). SMRs liegen in ihrer Leis-

tung bei unter 500 Megawatt. Sie würden in Fabriken als Module in Masse produziert und dann vor Ort zu größeren Kraftwerkeinheiten zusammengesetzt werden. Manche Experten erhoffen sich von dieser Fertigungs- und Betriebsweise eine höhere Sicherheit. Außerdem soll sie die Kraftwerke in der Investition günstiger machen als die mächtigen Anlagen, die derzeit existieren oder gebaut werden.

Auch einige der Generation-IV-Konzepte des GIF lassen sich in modularer Form verwirklichen. So wäre der Flüssigsalz-Reaktor von Terrestrial Energy mit seinen anvisierten 400 Megawatt Leistung und einer modularen Bauweise ein SMR. Die Anlage könnte auch in entlegenen Gegenden errichtet werden, beispielsweise um mit ihrem Strom und ihrer Prozesswärme Bodenschätze zu erschließen. Wenn die weiteren Hürden im Genehmigungsverfahren genommen und die technischen Herausforderungen gelöst sind, könnte Ende der 2020er Jahre solch ein Reaktor der Zukunft in Kanada in Betrieb gehen, an einem idyllisch grünen Fleckchen Erde zwischen Seen, Flüssen und Wäldern. ↩

(Spektrum.de, 27.12.2017)

CO<sub>2</sub>-FUSSABDRUCK

# So viel Kohlendioxid entsteht durchs Reisen

von Daniela Zeibig

Ein guter Teil des globalen CO<sub>2</sub>-Ausstoßes geht auf das Konto von Reisenden. Ganz vorne mit dabei: Deutschland, die USA, Indien und China.



**D**er Tourismus scheint einen deutlich größeren Beitrag zum globalen CO<sub>2</sub>-Ausstoß zu leisten als bislang angenommen. Darauf deutet eine Untersuchung hin, die Wissenschaftler um Arunima Malik von der University of Sydney in Australien im Fachmagazin »Nature Climate Change« veröffentlichten. Ihren Berechnungen zufolge gehen rund acht Prozent der weltweiten Treibhausgasemissionen auf das Konto von Reisen im In- und ins Ausland.

Bereits in der Vergangenheit haben Forscher versucht, die Auswirkungen des globalen Tourismus auf die Umwelt abzuschätzen. Dabei hätten sie sich aber zu meist auf verschiedene Unter Aspekte konzentriert, wie den Kohlendioxid ausstoß durch Unterkünfte oder Transportmittel in verschiedenen Ländern und Regionen, schreiben die Autoren. Malik und ihr Team führten nun eine weit umfassende Untersuchung durch und nahmen insgesamt rund eine Milliarde Lieferketten in 189 verschiedenen Ländern unter die Lupe. Dabei bezogen sie nicht nur naheliegende Faktoren mit ein, wie das Kohlendioxid, das durch Flüge in der Atmosphäre

landet, sondern berechneten etwa auch die CO<sub>2</sub>-Bilanz für das Essengehen im Restaurant oder den Verkauf von Souvenirs. So kamen sie schlussendlich auf den Wert von acht Prozent, der fast viermal so hoch liegt wie die Ergebnisse bisheriger Kalkulationen.

Den größten Beitrag zum tourismusbedingten CO<sub>2</sub>-Ausstoß leisten wenig überraschend wohlhabende Staaten. Je größer der Reichtum eines Landes, desto größer ist auch der »Tourismusfußabdruck«, entdeckten die Wissenschaftler. Zweifelhafter Spitzenreiter sind dabei die USA, gefolgt von China, Deutschland und Indien.

Durch das schnelle Wachstum der Tourismusbranche habe sich der reisebedingte CO<sub>2</sub>-Ausstoß zwischen 2009 und 2013 stetig vergrößert, schreiben Malik und ihre Kollegen. Sie appellieren deshalb an Bürger und Staaten, weniger zu fliegen und mehr Geld in die Reduktion von Kohlendioxid zu investieren. Zudem sei es unter Umständen sinnvoll, die Emission von Treibhausgasen durch Reisende als gesonderten Punkt mit in internationale Klimaabkommen aufzunehmen. ↩

(Spektrum.de, 07.05.2018)

# SPEKTRUM KOMPAKT APP



Lesen Sie Spektrum KOMPAKT optimiert für Smartphone und Tablet in unserer neuen App! Die ausgewählten Ausgaben erwerben Sie direkt im App Store oder Play Store.



MORAL

# MODERNER ABLASSHANDEL

von Alexander Mäder

Für jeden Flug ein paar Bäume pflanzen – kauft man sich damit nicht zu leicht von seinen Klimasünden frei?



**W**enn ich ausrechne, wie viele Treibhausgase auf mein Konto gehen, (beispielsweise mit dem Onlinerechner des Umweltbundesamts), muss ich meinen Kalender durchgehen und die vielen beruflichen und privaten Reisen zählen. Da kommen einige Tonnen Kohlendioxid im Jahr zusammen, und ich liege deutlich über dem Durchschnitt in Deutschland, obwohl ich kein Auto besitze. Dann suche ich mir mit meinem schlechten Gewissen einen Anbieter wie Myclimate oder Atmosfair und kompensiere die Emissionen, die ich zu verantworten habe. Mit meinem Geld werden Bäume gepflanzt, glaube ich – das klingt doch gut.

Solche Maßnahmen, der Luft das Kohlendioxid wieder zu entziehen und in Holz zu speichern, sind umstritten. Manche Kritiker fragen, ob die Projekte wirklich effektiv und nachhaltig sind. Weil es in dieser Kolumne um moralische Fragen gehen soll, will ich aber davon ausgehen, dass die Projekte tatsächlich das Klima schützen. Stattdessen möchte ich mich dem moralischen Einwand widmen: Darf man sich von seinen Sünden freikaufen, wenn man doch ei-

gentlich seinen Lebensstil ändern sollte? Der Papst bemüht laut dem Portal »katholisch.de« einen harten Vergleich: Das sei doch so, als würde ein Rüstungskonzern Krankenhäuser für die Menschen bauen lassen, die durch seine Waffen verletzt werden.

### **Bequemlichkeit, die man sich leisten kann**

Beim Kohlendioxid ist es aber anders, denn hier wird niemandem geschadet: Das Treibhausgas wird der Atmosphäre wieder entzogen und kann dann nicht mehr zur Erwärmung beitragen. Das ist – wenn es funktioniert – eine saubere Lösung. Der US-amerikanische Philosoph und Autor Michael Sandel trifft es besser mit einer Geschichte, die er gerne erzählt: 1998 führten einige israelische Kindergärten eine Strafgebühr ein, wenn Eltern ihre Kinder zu spät abholen. Doch das hatte nicht den gewünschten Effekt: Vielmehr verdoppelten sich die Verspätungen, weil sich die Eltern nun von ihrem schlechten Gewissen freikaufen konnten. Analog dazu könnte auch die Kompensation von Emissionen dazu führen, dass klimaschädliches Verhalten zementiert und vielleicht sogar verstärkt wird.

Aber wenn man einen Schritt zurücktritt, dann sieht die Lage doch so aus: Jeder sollte Verantwortung für seinen Dreck übernehmen, und ich kann es mir leisten, andere fürs Saubermachen zu bezahlen. Warum sollte das im Klimaschutz verwerflich sein, wenn es in anderen Bereichen des Lebens erlaubt ist, sich Bequemlichkeit zu leisten? Der Unterschied zu anderen Bereichen des Lebens liegt darin, dass die Menschheit in den nächsten Jahrzehnten ihre Emissionen praktisch auf null senken muss, wenn sie ihre Ziele im Klimaschutz einhalten will. Der Weltklimavertrag von Paris fordert, den Temperaturanstieg auf deutlich unter zwei Grad Celsius, vielleicht sogar unter 1,5 Grad Celsius zu halten (Artikel 2.1a). Welches Ziel gilt, ist noch offen, aber klar ist, dass beide Zielmarken nur durch eine radikale Reduktion der Emissionen eingehalten werden können. Daher muss ich mir die Frage gefallen lassen, ob auch alle anderen Menschen ihre Emissionen kompensieren dürfen wie ich. Wenn man für einen Großteil der Menschheit Wälder aufforsten müsste, würde man dafür einen guten Teil der derzeitigen Ackerflächen benötigen. Das kann ja nicht die Lösung sein.

## Der Preis ist zu niedrig

In ihrem Artikel »The Ethics of Carbon Offsetting« weisen Keith Hyams von der University of Reading und Tina Fawcett von der University of Oxford auf einen weiteren wichtigen Punkt hin: Ich komme mit meiner Klimakompensation billig weg – viel zu billig, weil sich nur wenige am modernen Ablasshandel beteiligen. Anna Segerstedt und Ulrike Grote von der Universität Hannover geben ein Beispiel: Sie haben 450 deutsche Touristen befragt, die in den letzten Jahren nach Afrika, Asien oder Lateinamerika geflogen sind. Nur etwa die Hälfte kannte die Kompensationsmöglichkeiten, und nur acht Prozent hatten sie schon einmal genutzt. Eine Mehrheit lehnte die Angebote als Maßnahme zum Klimaschutz übrigens ab.

Die Neutralisierung einer Tonne Kohlendioxid kostet mich 20 bis 25 Euro. Wäre ich auch dabei, wenn es das Doppelte oder Dreifache wäre, weil die Nachfrage größer ist? Hyams und Fawcett sind skeptisch: »Das vielleicht größte Problem besteht darin, dass die Kompensationsangebote die Tatsache ausnutzen, dass die meisten Menschen und Organisationen nur wenig motiviert sind, ihre Emissionen zu senken«,

schreiben sie. Sollten die Preise steigen, würden viele zurückschrecken – und die Preise würden wieder sinken.

Segerstedt und Grote haben in ihrer Umfrage herausgefunden, dass eine Mehrheit stattdessen eine Steuer auf Kohlendioxid vorziehen würde. Eine solche Steuer würde alle dazu anregen, sparsamer mit fossilen Brennstoffen umzugehen, und die Einnahmen könnten in den Klimaschutz fließen. Doch eine solche Steuer gibt es nicht. Daher werde ich meine Flüge und Bahnfahrten zunächst weiter per Ablasshandel kompensieren – und überlegen, wie ich mein Treibhausgaskonto weiter reduziere.

Die Moral von der Geschichte: Ich muss meinen Lebensstil ändern und weniger reisen. Sie auch? ↩

(Spektrum.de, 30.10.2017)

Spektrum  
der Wissenschaft

# KOMPAKT

Die Vielfalt retten  
mit neuen Methoden

# MODERNER NATUR- SCHUTZ

Biobanken | Zellen auf Eis  
Zoologische Gärten | Archen  
für bedrohte Arten?

Renaturierung | Die Wiederbewalder

HIER DOWNLOADEN

FÜR NUR  
€ 4,99



# Klimafaktor ENERGIEPOLITIK **Indien**

von Varun Sivaram

Der indische Subkontinent spielt eine entscheidende Rolle für die Zukunft der globalen Erwärmung. Nur wenn sich Indiens Energiepolitik dramatisch ändert, können die weltweit anvisierten Klimaziele erreicht werden.

**B**ei der Pariser UN-Klimakonferenz von 2015 diente ein glitzernder Wasserfall als Blickfang für den indischen Pavillon. Drinnen verkündeten Multimedia-Präsentationen und prominente Diskussionsrunden, dass Indien schon bald nur noch saubere Energie produzieren werde. Premierminister Narendra Modi ging noch weiter. Er erklärte sein Land zum Anführer einer neuen International Solar Alliance – eines Solarbündnisses mit dem Ziel, in 120 Ländern die Sonnenenergie zu fördern. Das offizielle Indien präsentierte sich als Vorreiter im Kampf gegen den globalen Klimawandel.

Ich kam damals gerade von einer Forschungsreise quer durch Indien zurück und hatte Mühe, den kühnen Optimismus mit den dort beobachteten Tatsachen zu vereinbaren: überall Kohlekraftwerke, ein störanfälliges Stromnetz, das von nennenswerten Mengen zusätzlicher Wind- oder Solarenergie hoffnungslos überfor-

---

**Varun Sivaram** gehört dem Council of Foreign Relations an, einer privaten Denkfabrik mit Sitz in New York und Washington. Er leitet deren Program on Energy Security and Climate Change. Zudem ist er außerordentlicher Professor an der Georgetown University in Washington.

dert wäre, und die verbreitete Meinung, Indien sei als Entwicklungsland nicht verpflichtet, seine CO<sub>2</sub>-Emissionen zu reduzieren, sondern dürfe mit fossiler Energie wachsen wie die großen Industrienationen vormals auch.

Dennoch unterzeichnete Indien zusammen mit 194 anderen Staaten das Pariser Klimaabkommen, das die Welt verpflichtet, die globale Erwärmung auf zwei Grad Celsius zu begrenzen. Im November 2016 trat das Abkommen in Kraft und wurde nach internationalem Recht für jedes der beteiligten Länder bindend – also auch für Indien. Nur US-Präsident Donald Trump kündigte Anfang Juli 2017 die Absicht an, von der Pariser Übereinkunft zurückzutreten.

Trotz der pathetischen Rhetorik hat die indische Regierung höchst unklare Vorstellungen von einer durch saubere Energie geprägten Zukunft. Zwar setzt sich Indien ehrgeizige Ziele für die Nutzung von Sonne und Wind, verpflichtet sich aber nur unzureichend, seinen CO<sub>2</sub>-Ausstoß insgesamt zu reduzieren. Selbst wenn die Regierung gar nichts unternimmt und zusieht, wie die Emissionen rapide steigen, bleiben diese im Rahmen der enorm hohen Grenzwert-

AUF EINEN BLICK

## Ohne Indien unmöglich

- 1 Der Energiebedarf der wachsenden Bevölkerung Indiens nimmt stark zu. Wenn sich der dortige Energiesektor nicht wandelt, bedrohen seine enormen CO<sub>2</sub>-Emissionen die globalen Klimaziele.
- 2 Um den CO<sub>2</sub>-Ausstoß zu beschränken, muss Indien den Übergang von Kohle zu Erdgas bewältigen und ein zuverlässiges Stromnetz aufbauen, das große Mengen von Wind- und Solarenergie aufnehmen kann.
- 3 Zusätzlich muss das Land Energiesparmaßnahmen einleiten und umweltschonende Verkehrsmittel fördern. Dafür braucht es technische und finanzielle Unterstützung aus dem Ausland.

te, die sich das Land in Paris genehmigt hat.

Das wäre eine Katastrophe für das Weltklima. Indien zählt zu den am schnellsten aufstrebenden großen Wirtschaftsmächten. Seine Bevölkerung wird bis 2040 auf rund 1,6 Milliarden ansteigen, und der Strombedarf dürfte sich vervierfachen. Ohne drastische Gegenmaßnahmen wird das Land in der Jahrhundertmitte wahrscheinlich der größte Treibhausgasproduzent weltweit sein – gegenwärtig belegt es noch den dritten Platz hinter China und den USA – und damit alle Bemühungen zu nixtemachen, den globalen Klimawandel zu bremsen. Denn sollte Indien seinen sprunghaft ansteigenden Energiehunger nur mit Kohlekraft stillen, wird sich sein Ausstoß von Treibhausgasen bis 2040 verdoppeln.

Dabei wäre das überhaupt nicht nötig, denn energiepolitisch ist Indien ein fast unbeschriebenes Blatt. Während in den alten Industrieländern die Aufgabe darin besteht, die traditionelle fossile Basis durch erneuerbare Energien zu ersetzen, verfügt Indien noch gar nicht über eine derart ausgebaute Infrastruktur. Ein Entwicklungsland hat die Wahl, von vornherein in Wind, Sonne und Erdgas zu inves-



tieren statt in Kohle. Zudem können sparsamere Geräte, Fabriken und Fahrzeuge den Energiebedarf zügeln und den Einsatz sauberer Quellen erleichtern. Was wäre nötig, um Indien auf diesen Pfad zu führen? Und welche energiepolitischen Entscheidungen hätten katastrophale Folgen für unseren Planeten?

### **BRENNENDE KOHLEFEUER**

**In einer illegalen Mine in der indischen Stadt Jharia bauen Menschen Kohle ab. Seit Jahrzehnten brennen dort in manchen Bereichen ungeheure Kohlefeuer, verursacht durch Zigaretten, Blitzschlag oder Selbstentzündung. Sie blasen permanent giftige Gase und Kohlendioxid in die Luft.**

## Von schmutzigen Quellen zu sauberem Strom

Derzeit prägen umweltschädliche Quellen Indiens Energiemix. Zwei Drittel der Haushalte heizen und kochen mit Stroh, Holzkohle, Brennholz oder getrockneten Kuhfladen. Das deckt fast ein Viertel des nationalen Primärenergiebedarfs. Den Rest liefern fast ausschließlich Kohle und Öl. Kohlekraftwerke erzeugen drei Viertel des Stroms, und die Hälfte der indischen Fabriken verbrennt Kohle für die Stahlgewinnung und andere Prozesse. Der Transportsektor ist sogar fast komplett auf Erdöl angewiesen.

Die fossilen Brennstoffe sind nominell billig, fordern aber einen hohen Tribut. Sie tragen nicht nur zum Klimawandel bei, sondern auch zur städtischen Luftverschmutzung: 10 der 20 smogreichsten Städte der Welt liegen in Indien. Kohlekraftwerke verbrauchen viel Wasser. Eine wachsende Abhängigkeit von Kohle- und Ölimporten schwächt die Wirtschaft; im Lauf der globalen Ölkrisen wurde die indische Währung stark abgewertet.

Der beste Weg zu moderner und sauberer Energie führt über den Stromsektor. Erneuerbare Stromquellen werden mit fal-

lenden Kosten zunehmend wettbewerbsfähig gegenüber Kohle. Wenn Motorroller, Autos, Busse und Lastwagen künftig mit Strom fahren, ist der Verkehr nicht mehr völlig vom Erdöl abhängig.

Aber das alles ist leicht gesagt. Mehr als 300 Millionen Inder haben überhaupt keinen Zugang zum Stromnetz. Weitere Millionen sind zwar angeschlossen, bekommen aber nur hier und da Strom, weil das Netz in einem erbärmlichen Zustand ist – und gewiss nicht in der Lage, zusätzliche Energie aus Wind und Sonne zu verkraften. Nach heftigen Unwettern bleiben manchmal tausende Menschen wochenlang ohne Strom, wie ich auf meiner Reise durch Indien erlebte.

Ungeachtet dieser Tatsachen malt Modis Regierung ein verheißungsvolles Bild von der Zukunft. In Paris gelobte sie, den nicht fossil erzeugten Stromanteil von heute 24 Prozent bis 2030 auf 40 Prozent zu erhöhen. Ende 2016 erhöhte Modi seine Prognose sogar auf 60 Prozent – ein wahrhaft ehrgeiziges Ziel. Heutzutage beruht Indiens nichtfossiler Strom vorwiegend auf Wasserkraft, aber die Planung weiterer Wasserkraftwerke droht an vielen Hindernissen zu scheitern: Baugenehmigungen sind schwie-

Die fossilen Brennstoffe sind nominell billig, fordern aber einen hohen Tribut

rig zu beschaffen, für Stauseen müssen große Flächen aufgekauft werden, und das Aushandeln von Entschädigungen für die umgesiedelten Gemeinden schürt politischen Streit. Auch Kernkraftwerke können angesichts chronischer Bauverzögerungen keine führende Rolle übernehmen.

Um ihr 60-Prozent-Ziel zu erreichen, setzt die Regierung deshalb fast ausschließlich auf Sonne und Wind, die bis 2030 rund 350 Gigawatt liefern sollen. Davon würden 250 Gigawatt durch Solarkraft erzeugt; das wären mehr als 80 Prozent der heute weltweit verfügbaren Solarenergie. Dieses Ziel ist zwar kühn, wird aber immer realistischer dank der fallenden Solarkraftkosten: Sie sind in Indien während der vergangenen fünf Jahre um zwei Drittel gesunken. Eine neue Solaranlage ist schon heute billiger als ein neues Kraftwerk, das Importkohle verbrennt, und wird 2020 sogar kostengünstiger sein als eines, das heimische Kohle nutzt. Außerdem investieren die Regierung und ausländische Geldgeber in ein nationales Netz so genannter grüner Korridore. Diese Übertragungswege verbinden sonnige Regionen wie die Wüste Thar im Bundesstaat Rajasthan mit weit entfernten Städten wie Mumbai und Delhi.

Die Regierung setzt sich das ehrgeizige Ziel, die Dächer in Städten, aber auch in entlegenen, nicht ans Stromnetz angeschlossenen Dörfern mit Solarmodulen auszustatten. Zum Vergleich verweist man gern auf das Fernmeldewesen, das einen Riesensprung vom lückenhaften Festnetz zu flächendeckendem Mobilfunk geschafft hat. Ebenso, meint man, könnte Indien in kurzer Zeit zu lokaler Solarenergie übergehen, die ohne nationales Leitungsnetz auskommt. Tatsächlich hat sich die Menge der Solarmodule in jedem der vergangenen vier Jahre fast verdoppelt.

Das mag zwar sein, aber große Fotovoltaik-Freiflächenanlagen sind viel billiger, und ein umfassendes Netz kann moderne Geräte wesentlich besser mit Strom versorgen – und nicht bloß die paar Glühlampen und Ventilatoren, für die ein Solarmodul auf dem Dach ausreicht. Es gilt also, sowohl die zentrale als auch die dezentrale Energieversorgung zu fördern und das Stromnetz auszubauen und zu verbessern. Dabei können einzelne Solarmodule und Batterien das gesamte System stabilisieren, indem sie zu einem lokalen Netz – einem Microgrid – verbunden werden, das eine Wohngegend, ein

Krankenhaus oder ein Rechenzentrum bedient.

### **Erdgas hilft – doch Energiesparen entscheidet**

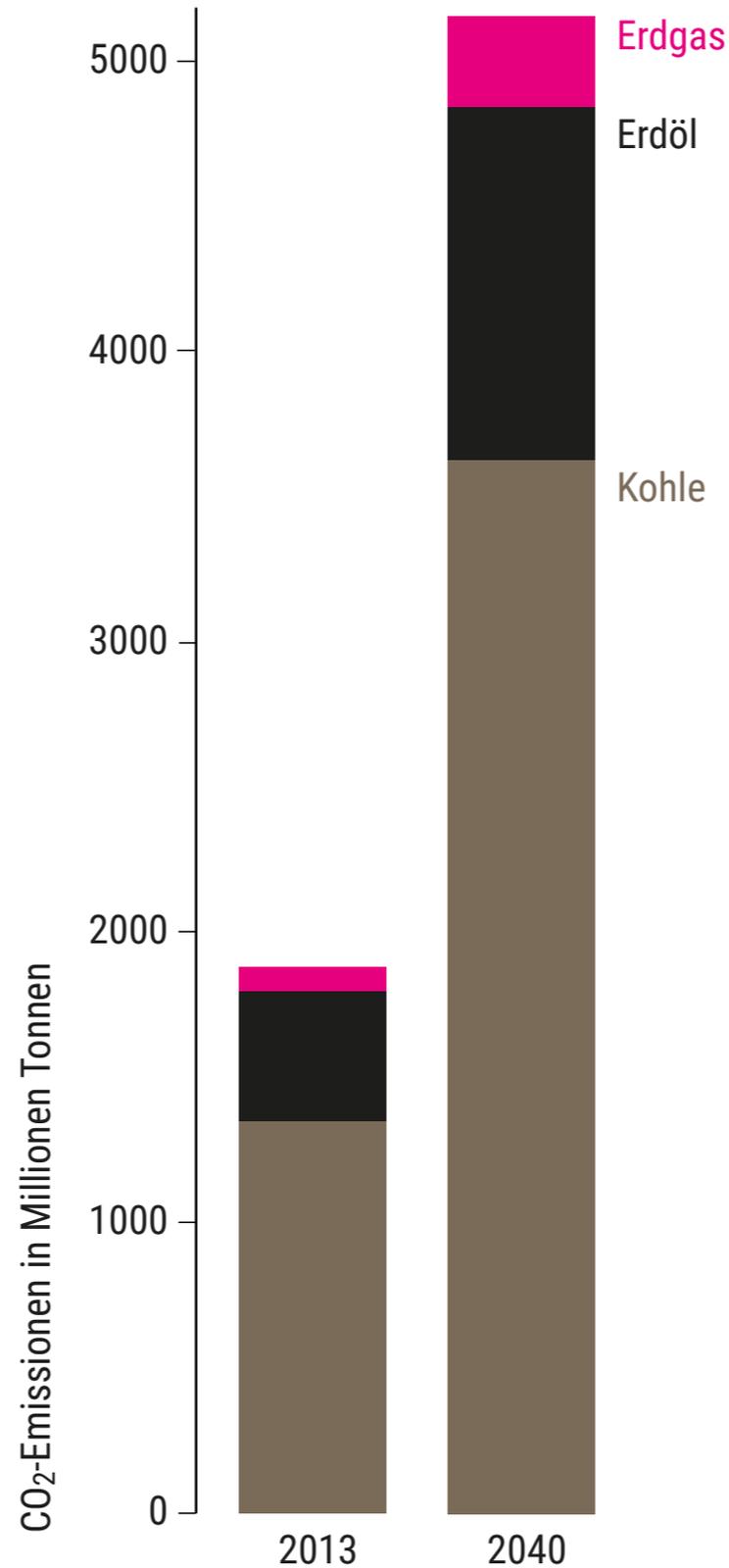
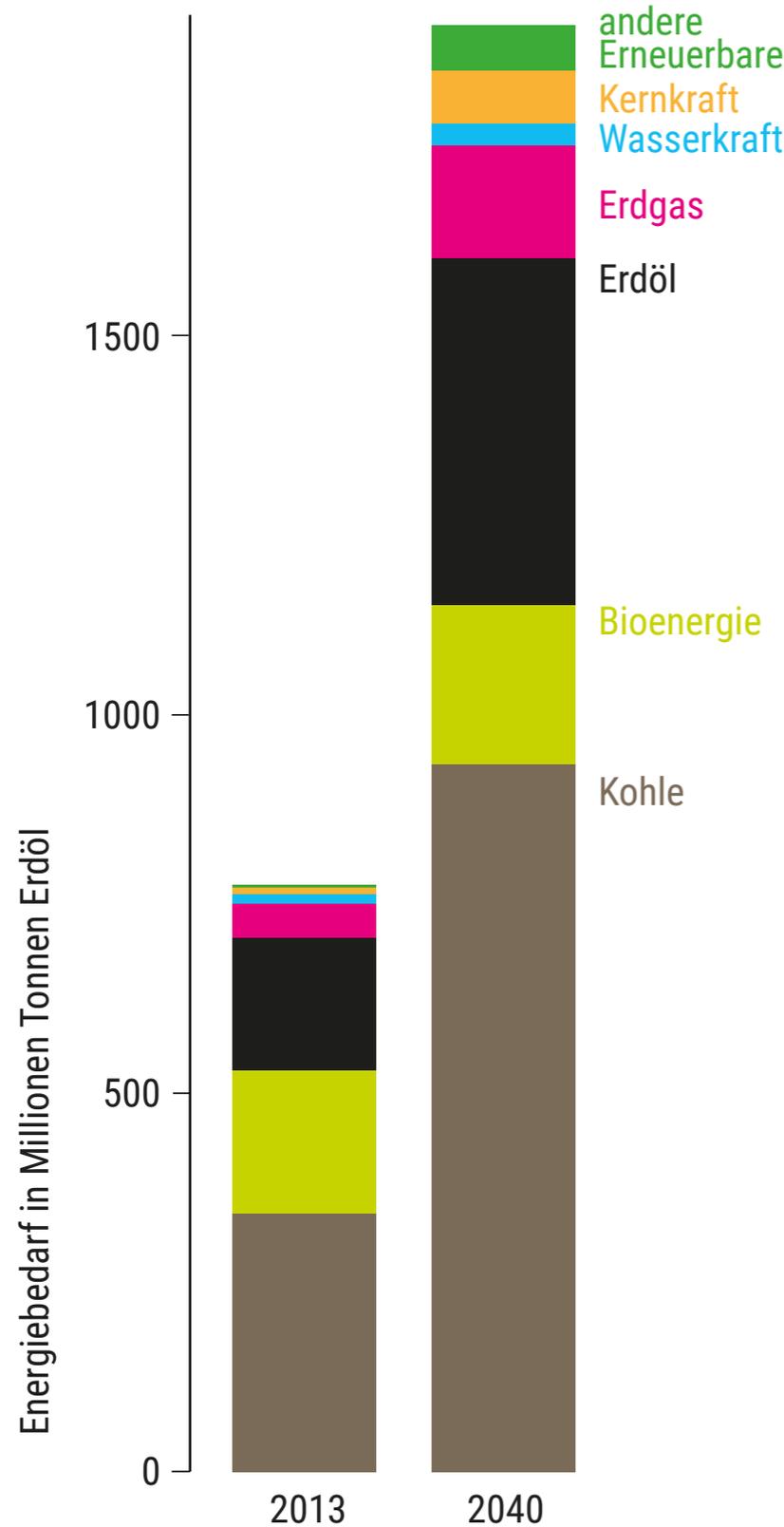
Dennoch wird das Angebot an erneuerbarer Energie dem schnell zunehmenden Bedarf nicht nachkommen. Zudem sind verlässliche Energiequellen nötig, die das unvorhersehbare Schwanken bei Solar- und Windkraftanlagen ausgleichen. Vorläufig ist das Speichern in Batterien zu teuer, um das Problem flächendeckend zu lösen.

Als Ausweg bieten sich Gaskraftwerke an: Erdgas verursacht nur halb so viel CO<sub>2</sub>-Ausstoß wie Kohle. Derzeit erzeugt es bloß acht Prozent von Indiens Strom, denn die heimische Produktion fällt kaum ins Gewicht, und Importgas ist teuer. Deshalb haben frühere Regierungen lieber auf die reichlich vorhandene heimische Kohle gesetzt. Doch da das weltweite Angebot von Flüssiggas zunimmt, sinken die Preise in Asien rapide.

Gaskraftwerke lassen sich billiger und schneller errichten als Kohlekraftwerke. Zudem können sie ihre Leistung rasch variieren und damit die Schwankungen der erneuerbaren Energien ausgleichen. Erdgas

Mit steigendem Energiebedarf ...

... wachsen auch die CO<sub>2</sub>-Emissionen



## Mehr Energie, mehr Emissionen

Wenn Indiens Bevölkerung und seine Wirtschaft wie prognostiziert wachsen, würde sich die Energienachfrage bis 2040 gegenüber 2013 mehr als verdoppeln. Falls die Energiepolitik des Landes lediglich den 2015 bei der Pariser Klimakonferenz eingegangenen Verpflichtungen folgt, wird sich der Energiemix nur langsam ändern, und die CO<sub>2</sub>-Emissionen könnten ebenfalls auf das Zweifache steigen. Für eine umweltfreundlichere Entwicklung muss Indien künftig stärker auf Erdgas, Solarenergie und Windkraft setzen sowie Elektroautos und das Energiesparen fördern.

kann an Stelle von Kohle und Öl Gebäude und Fabriken mit Wärme versorgen; es kann sogar Verkehrsmittel antreiben und dadurch die CO<sub>2</sub>-Emissionen weiter reduzieren. Vikram Singh Mehta, Leiter der Denkfabrik Brookings India und früher Chef der Firma Shell India, plädiert daher dafür, Indiens Energiepolitik auf Erdgas auszurichten. Das Land müsse massiv in ein eigenes Pipelinennetz für den Gastransport investieren sowie in Terminals für den Flüssiggasimport.

Die Regierung Modi scheint auf Mehta zu hören. Sie versprach im Dezember 2016, weder die öffentliche Hand noch der Privatsektor würde nach 2022 noch ein einziges Kohlekraftwerk in Auftrag geben; dafür soll mehr Erdgas zum Einsatz kommen.

Aber selbst bei einer konsequenten Hinwendung zu erneuerbaren Energien und Erdgas werden auf mittlere Sicht Kohle und Erdöl den indischen Energiemix prägen. Deshalb sind, wie Navroz Dubash vom Center of Policy Research in Neu-Delhi betont, Investitionen in eine energieeffiziente Wirtschaft entscheidend. Indien könnte zum leuchtenden Vorbild eines Entwicklungslands werden, dessen Wirtschaft wächst, ohne dass gleichzeitig Energiever-

brauch und Emissionen durch die Decke gehen.

Nach einer Prognose der Internationalen Energieagentur in Paris wird Indien bei gleichbleibender Effizienz 2040 viermal so viel Strom brauchen wie gegenwärtig, doch eine konsequente Energiesparpolitik kann die Zunahme halbieren. Derzeit verzehrt die Industrie mehr als 40 Prozent des indischen Energieaufkommens. Bei der Produktion von Stahl, Ziegeln und Düngemitteln würden effizientere Maschinen sowie der Übergang von Kohle zu Gas oder Strom enorm viel Energie und Schadstoffe einsparen.

Auch der atemberaubend wachsende Bausektor birgt ein großes Einsparpotenzial. Drei Viertel der Gebäude, die 2040 stehen werden, sind heute noch nicht vorhanden. Entsprechend droht der Stromverbrauch für Wohnungen und Geschäfte vor allem durch die Ausbreitung von Klimaanlage zu explodieren, wenn die neuen Gebäude nicht Energie sparen.

Bereits heute ist Indien ein Vorreiter bei Maßnahmen zur Kostensenkung von energieeffizienten Produkten. Eine öffentlich-private Partnerschaft namens Energy Efficiency Services Limited, die massen-

taugliche Geräte billig anbietet, feiert durchschlagende Erfolge. Die Initiative hat bisher mehr als 200 Millionen LED-Energiesparlampen zum Preis herkömmlicher Glühbirnen verkauft – somit deutlich billiger als im Westen üblich – und subventioniert nun die Entwicklung effizienter Klimaanlageanlagen. Wenn das Beispiel Schule macht, wird die millionenfache Nachfrage des neu entstehenden Mittelstands nach modernen Dienstleistungen die Produktion sparsamerer Geräte ankurbeln.

Indien könnte auch etwas gegen die wachsenden Emissionen des Verkehrssektors unternehmen. Derzeit verbraucht er nur 14 Prozent des nationalen Energieaufkommens, weil sehr wenige Inder ein Auto besitzen, doch bis 2040 dürfte sich die Treibstoffnachfrage infolge höherer Einkommen mehr als verdreifachen. Die politischen Entscheidungsträger verlangen inzwischen bessere Verbrauchswerte bei neu zugelassenen Fahrzeugen. Die indischen Städte sollten darüber hinaus in Ladestationen investieren, um Elektroautos attraktiver zu machen und den Einsatz erneuerbarer Energien im Verkehr zu ermöglichen. Da mehr als 80 Prozent aller in Indien verkauften Fahrzeuge Zwei- oder Dreiräder

sind, könnte die Regierung die Elektrifizierung vorantreiben, indem sie Elektroroller und -rikschas fördert. Zudem würde ein gutes öffentliches Verkehrswesen das Verlangen nach privatem Autobesitz bremsen.

Ein besser organisierter städtischer Verkehr könnte buchstäblich Millionen Leben retten. Delhi und andere Großstädte ersticken im Smog und leiden unter der vor allem von Dieselfahrzeugen erzeugten Feinstaubbelastung; dadurch sinkt die Produktivität der Wirtschaft um jährlich 18 Millionen Dollar, und jedes Jahr sterben mehr als eine Million Menschen vorzeitig.

### **Licht und Schatten der indischen Solarprogramme**

Bei meinen Gesprächen mit Firmenvertretern fiel mir ein starker Kontrast zwischen Indern und Ausländern auf. International tätige Firmen sehen in Indien einen lukrativen Markt, der im Rekordtempo größer wird – doch indische Unternehmer äußern unter vier Augen nur Hohn und Spott. Sie wissen um Indiens maroden Energiesektor, die fehlende Förderung für Infrastrukturprojekte, lähmende politische Streitereien und Korruption. Diese Hindernisse blockieren die reibungslose

Einführung sauberer Energie vor allem aus vier Gründen.

Erstens ist das verrottete Stromnetz überhaupt nicht darauf vorbereitet, auch nur einen kleinen Zuwachs an erneuerbaren Quellen zu bewältigen, und die Überlastung wird immer schlimmer. Da mit dem Klimawandel Dürren häufiger werden, setzen die Bauern verstärkt Bewässerungspumpen ein, die tiefere Grundwasserschichten anzapfen und dabei mehr Strom verbrauchen. 2012 verursachte das massiv zunehmende Einsetzen von Pumpen den größten Stromausfall der indischen Geschichte. Immerhin fördert die Regierung den Einsatz von Solarmodulen, um damit zunächst 200 000 Bewässerungspumpen anzutreiben. Am Ende sollen alle 26 Millionen Pumpen, die derzeit mit Diesel oder Strom aus der Steckdose laufen, Solarenergie nutzen. Aber die bereits bankrotten Versorgungsunternehmen können nichts in ein besseres Netz investieren, denn sie stecken in einem Teufelskreis: Sie geben ihren Strom – meist auf Druck einflussreicher Lokalpolitiker hin – zu billig ab, verschulden sich noch mehr und können das Netz daher weder aufrechterhalten noch vor ungezügelm Stromdiebstahl schützen.

Zweitens wird der Aufbau der Infrastruktur durch fehlende private Finanzierung und durch umständliche Vorschriften behindert. Dabei erfordert allein der Ausbau erneuerbarer Energien bis 2020 Investitionen von 150 Milliarden Dollar – weit mehr, als die Regierung aufbringen kann. Auch hier entsteht ein Teufelskreis: Die Banken haben vor allem im Energiesektor bereits große Kredite für gescheiterte Projekte vergeben und sind deshalb zu weiteren Investitionen kaum in der Lage. Oft verlangen sie exorbitante Zinsen. Zudem scheitern viele Projekte an unklaren Regierungszusagen oder verzögern sich durch Schwierigkeiten beim Landkauf.

Drittens behindert die Politik vernünftige Maßnahmen. Zwar hat die Modi-Regierung ehrgeizige Ziele für Wind- und Solarenergie gesetzt, doch die Durchführung liegt zumeist bei den Bundesstaaten, die gern auf Zeit spielen. Eine weitere Regierungsinitiative zur Streichung der Treibstoffsubventionen erhöhte zwar die Preise für Benzin und Diesel, scheiterte aber beim Verteuern von Kerosin und Heizgas an politischen Widerständen. Solange Erdgas unter dem Marktwert verkauft wird, verspüren die Firmen kaum Anreize, neue Gas-



DPA / WWF-INDIA

quellen zu erschließen, um die heimische Produktion zu steigern.

Und viertens hat die von Modi eingeführte Besteuerung der Kohleförderung nicht nur die Bergbauunternehmen erbittert, sondern auch deren Kunden – insbesondere die Stahlfirmen – sowie die Regierungen der Kohle produzierenden Bundesstaaten. Das sind mächtige politische

Kräfte, an denen jede weitere Erhöhung der Steuer scheitern dürfte. Sie ist ohnehin viel niedriger als die Kosten der Umweltbelastung, die das Verbrennen von Kohle verursacht.

In dieser verfahrenen Lage geht es für die Politik zunächst einmal darum, die Versorgungsunternehmen von ihrer drückenden Schuldenlast zu befreien, denn nur

## MICROGRIDS

**Lokale Netze – so genannte Microgrids – können Regionen mit Strom versorgen, die Überlandleitungen nicht erreichen. Solarmodule liefern per Microgrid Strom für ein Dorf. In einem anderen lokalen Netz speichern Batterien die Solarenergie für trübe Tage.**

dann können sie das Netz überarbeiten und erneuerbare Energie bezahlen. Die Regierung hat immerhin versprochen, einen Teil der Schulden zu übernehmen, wenn die Unternehmen im Gegenzug die massiven Verluste im Netz verringern, die oft mehr als ein Viertel der eingespeisten Energie auffressen. Überdies müsste Modi den Einfluss der Bundesstaaten auf die Energieversorger eindämmen, damit die Firmen nicht mehr gezwungen sind, lokalen Politikern zuliebe den Strom zu billig zu verkaufen.

Ebenso wichtig wären schärfere Vorschriften zur Energieeinsparung für die Industrie sowie das schnellere Bewilligen von Gaskraftwerken, Pipelines und Anlagen zum Flüssiggasimport. Gefragt sind auch stärkere Anreize zur Abscheidung

und Speicherung von CO<sub>2</sub>-Emissionen, wie dies eine Chemiefabrik in Südindien inzwischen praktiziert. Noch besser wäre es, schon früher als 2022 keine neuen Kohlekraftwerke mehr zuzulassen. All das wird ein Zusammenspiel von Zentralregierung und Einzelstaaten erfordern sowie Durchsetzungsvermögen gegen Industrielobbys.

Politisches Einvernehmen lässt sich am besten herstellen, wenn die erneuerbaren Energien finanzielle Vorteile bringen. Das haben Initiativen wie Energy Efficiency Services Limited durch die Förderung lokaler Kleinbetriebe erreicht.

### Ein Anliegen der ganzen Welt

Eines ist allerdings klar: Indien wird den Übergang zu niedrigen CO<sub>2</sub>-Emissionen nicht allein schaffen. Es braucht Hilfe bei der Entwicklung und Finanzierung neuer Technologien. Derzeit unterhält Indien bereits Partnerschaften mit den USA für die Erforschung und Entwicklung sauberer Energien, mit Deutschland zur Finanzierung eines stabilen Stromnetzes und mit multilateralen Entwicklungsbanken für die umweltfreundliche Modernisierung des Energiesektors.

Doch der Umfang der Hilfe muss mindestens auf das Zehnfache steigen. Andernfalls wird Indien weiterhin ineffiziente Kohlekraftwerke installieren, ausländisches Öl verschwenden und sich mit einem unzuverlässigen Stromnetz abmühen. Statt bloß zuzuschauen, ob und wie Indien allein in eine CO<sub>2</sub>-arme Zukunft schreitet, sollten die Industrieländer ihm dabei helfen. Dafür gibt es einen starken finanziellen Anreiz: Länder, die Indiens Energiewandel beschleunigen, eröffnen der eigenen sauberen Energietechnik einen lukrativen Exportmarkt. Und darüber hinaus hängt davon die Zukunft unseres Planeten ab. ↩

(Spektrum der Wissenschaft, Oktober 2017)

Berry, S. et al.: Energizing India: Towards a Resilient and Equitable Energy System. SAGE Publications, 2017

Ebinger, C. K.: India's Energy and Climate Policy: Can India Meet the Challenge of Industrialization and Climate Change? Brookings Institution, 2016

Sivaram, V. et al.: Reach for the Sun: How India's Audacious Solar Ambition Could Make or Break its Climate Commitments. Steyer-Taylor Center for Energy Policy and Finance, Stanford University, 2015

International Energy Agency (Hg.): India Energy Outlook. World Energy Outlook Special Report. Organisation for Economic Co-Operation and Development, Paris 2015

# Spektrum PLUS+

## DIE VORTEILSSEITE FÜR ABONNENTEN

Exklusive Vorteile und  
Zusatzangebote für  
alle Abonnenten von  
Magazinen des Verlags  
**Spektrum** der Wissenschaft

Zur Anmeldung:

**Spektrum.de/plus**

RECYCLING IN AFRIKA

# Mit Unkraut und Kuhmist gegen Abholzung und Klimawandel

von Roman Goergen



Abseits von Klimagipfeln und Sonntagsreden haben clevere Unternehmer in Afrika simple Lösungen für komplexe Probleme erdacht. Wir stellen fünf außergewöhnliche Projekte vor.

## **S**üdafrika: Wie Kuhfladen helfen, schicke Autos zu bauen

Die Region um Bronkhorstspruit in der südafrikanischen Provinz Gauteng liegt unweit der Metropolen Johannesburg und Pretoria. Dies ist das Kernland von Südafrikas Fleischproduktion, und Rinderherden bevölkern die grünen Weideflächen bis zum Horizont. Allein rund 30 000 von ihnen grasen in den Feedlots des Fleischproduzenten Beefcor rund um das Biogaswerk von Bio2Watt. Denn so viele Kühe produzieren viel Mist und damit auch einen begehrten Energieträger.

Die Anlage liefert 4,4 Megawatt Strom. Solche Projekte für erneuerbare Energien kämpfen in Südafrika immer noch um Anerkennung. Zwar haben fast 90 Prozent aller Südafrikaner regelmäßigen Zugang zu Elektrizität, doch es gibt Engpässe. Besonders in den Jahren 2014 und 2015 mussten

immer wieder geplante Stromausfälle einer Überlastung des Stromnetzes in den Städten vorbeugen. Der Regierung wird eine verfehlte Energiepolitik vorgeworfen, die vornehmlich auf Kohle setzt. Sogar der Bau neuer Atomkraftwerke ist in Planung.

Kohle und Atomkraft passen allerdings nicht in das PR-Konzept des deutschen Automobilherstellers BMW. Bis zum Jahr 2020 wollen die Bayern in all ihren Werken Elektrizität zu 100 Prozent aus erneuerbaren Energien beziehen. Schon jetzt erreicht der Autoriese nach eigenen Angaben eine Quote von 51 Prozent.

In Südafrika produziert BMW bereits seit den 1970er Jahren Fahrzeuge in seinem Rosslyn-Werk bei Pretoria. Derzeit rollen dort jährlich 60 000 Limousinen der 3er-Serie vom Band. Das nahe gelegene Biogaswerk von Bio2Watt passt BMW daher gut ins Konzept, und seit Oktober 2015 bezieht das Rosslyn-Werk von dort grüne Energie. Ein Über-

einkommen sieht vor, dass nun zwischen 25 und 30 Prozent des BMW-Bedarfs so gedeckt werden. In Bronkhorstspruit werden jährlich 40 000 Tonnen Kuhmist und 20 000 Tonnen gemischter organischer Abfall verwertet. Der kommt von anderen örtlichen Firmen, zum Beispiel saurer Joghurt, Hundefutter, abgelaufene Getränke oder Restaurantabfälle. All dies wird in zwei anaeroben Biogasanlagen vergärt. Das so entstandene Gas gelangt dann in ein Blockheizkraftwerk, wo es zur Stromerzeugung verbrannt wird.

Die Southern African Biogas Industry Association schätzt, dass Biogas in Südafrika eine Kapazität von bis zu 2,5 Gigawatt erreichen kann. Dafür könnten Abwasser, verdorbene Lebensmittel, Tiermist und andere Abfälle der Landwirtschaft, Schlachthöfe, Brauereien und Käsereien recycelt werden. Bio2Watt-Geschäftsführer Sean Thomas ist optimistisch: »Wir haben allein in Südafrika rund vier Millionen Rinder.«



**BIOGASANLAGE UND BIOGASPRODUZENTEN**  
Bei der südafrikanischen Fleischproduktion fallen gewaltige Mengen an Kuhmist an. In Biogasanlagen wie hier bei Bio2Watt in Bronkhorstspruit entsteht daraus elektrischer Strom und Dünger.

## **Kenia: Auch Papier kann viel Mist ertragen**

Die Devise, dass Tiermist in der Welt des Recycling durchaus brauchbar ist, gilt auch in Kenia. Der ostafrikanische Staat kämpft gegen Entwaldung. Weniger als zwei Prozent seiner Landfläche sind nur noch von Wald bedeckt. Durch diesen Verlust gehen in Kenia auch die Entwässerungsgebiete zurück. Direkte Folgen sind Wasserknappheit und damit verbunden Energiemangel und Armut. Nach Angaben der Kenya Forestry Working Group verliert das Land

jährlich 300 Millionen US-Dollar durch die Folgen der Entwaldung.

Über Jahrzehnte trug Kenias Papierindustrie zu dieser Abholzung bei. Nun findet ein Umdenken statt. Dabei steht Elefantendung im Mittelpunkt. Die Dickhäuter fressen viel Gras und andere Pflanzen mit hohen Faseranteilen. Damit sind ihre Ausscheidungen für die Papierindustrie fast genauso gut wie Holz. Bei Kenias größtem Papierproduzenten Transpaper Kenya gehen bereits 20 Prozent der Gesamtpro-

duktion auf die Verdauung der Elefanten zurück. 17 Firmen verwandeln landesweit Elefantendung in Papier.

Die Idee schützt nicht nur vor der Abholzung der Wälder, sie trägt auch dazu bei, den Konflikt zwischen wilden Tieren und Kenias Bauern zu entschärfen. Angefangen hat nämlich alles mit einem Pilotprojekt in den 1990er Jahren im von örtlichen Kommunen betriebenen Elefantenreservat Mwalunganje, unweit von Mombasa. Die Bauern dort hatten genug vom Tourismus im staatseigenen Park Shimba Hills, an dessen Einnahmen sie nicht teilhaben konnten, während gleichzeitig die hungrigen Elefanten des Parks immer wieder ihre Ernten zerstörten. Also begannen sie mit eigenen Projekten, die ihnen nicht nur Anteile aus dem Tourismusgeschäft bescherten, sondern selbst auch wieder neue Initiativen auf den Weg brachten, zum Beispiel Imkereien, die den nützlichen Nebeneffekt hatten, mit ihren Bienen die Elefanten von



### **INTERESSANTER ROHSTOFF**

**Die unverdauten Pflanzenfasern im Mist von Elefanten eignen sich zur Produktion umweltfreundlichen Papiers.**

Anbauflächen fernzuhalten. Schließlich kamen die Bauern auf die Idee, den Dung in Papier zu verwandeln.

»Der Prozess ist ganz einfach«, sagt John Matano, Gründer von Nampath Paper. »Erst waschen wir den Dung, bis hauptsächlich pflanzliche Faser übrig ist. Danach kochen wir, was übrig ist, für vier Stunden«, so Matano. Anschließend gehe es weiter wie bei konventioneller Papierproduktion.

Während viele lokale Projekte aus dem Elefantendung handgeschöpfte, bräunliche Schmuckpapiere zum Beispiel für Einbände herstellen, lässt sich mit entsprechenden Maßnahmen auch normales weißes Schreibpapier erzeugen. Ein durchschnittlicher Elefant frisst 250 Kilo Futter pro Tag. Daraus entsteht 50 Kilo Dung. Diesen verwerten Matano und seine Kollegen zu rund 125 Seiten DIN-A4-Papier.

### **Kamerun: Von der Bananenschale zum Kohlebrikett**

Mangrovenwälder zählen zu den produktivsten Ökosystemen der Erde. Durch die besonderen Bedingungen im Gezeitenbereich hat sich hier eine hoch spezialisierte Tier- und Pflanzenwelt entwickelt. Doch die Man-

grovenwälder sind in Gefahr. Die Gewächse müssen den Sandstränden neuer Ferienanlagen weichen, oder sie werden direkt als Brennmaterial abgeholzt. Nach Angaben des World Wildlife Fund sind weltweit bereits 35 Prozent der Mangroven verloren. Eine von sechs in den Mangroven lebenden Spezies ist vom Aussterben bedroht.

Auch in Kamerun nutzen Fischer die Mangroven als Brennmaterial für ihre Feuer, um den gefangenen Fisch zu trocknen, und um Holzkohle zu gewinnen. Rund 200 000 Mangrovenbäume werden dafür landesweit jährlich gefällt, besagt eine Studie im »African Journal of Environmental Science and Technology«.

Dies möchte Müller Tenkeu Nandou ändern. Der Absolvent der Universität von Douala gründete dazu mit sechs Kommilitonen 2014 Kemit Ecology, ein kleines Unternehmen, das seitdem in dem kamerunischen Küstenort umweltfreundliche Kohlebriketts herstellt. »Wir verwerten all den organischen Müll, der hier anfällt – Bananenschalen, Rohrzuckerabfälle, Maisschalen und viele andere Nebenprodukte der Landwirtschaft«, sagt Nandou.

In fünf Produktionsschritten verwandelt der Ökounternehmer dann den Abfall

»Während der Verbrennung entsteht wesentlich weniger CO<sub>2</sub> als bei traditioneller Holzkohleproduktion«

[Müller Tenkeu Nandou]



## **BIOBRIKETTS AUS PLANZLICHEN ABFÄLLEN** **Das Kameruner Unternehmen Kemit Ecology produziert, noch in kleinem Maßstab und mit viel Handarbeit, Kohlebriketts aus Pflanzenabfällen. Die Briketts sind herkömmlichen Holzkohlen vielfach überlegen.**

den zählen Bäckereien, Restaurants, Hotels und Privatleute.

Der Jungunternehmer verweist außerdem auf die zahlreichen weiteren positiven Nebeneffekte seines Produkts: »Wir schaffen einen Markt für biologischen Abfall in Kamerun.« Denn Menschen können kompostierbaren Abfall sammeln und an Kemit verkaufen. Außerdem kann die Ökokohle dazu beitragen, Holzherde in Kamerun zurückzudrängen. Nach Regierungsangaben verwenden immer noch 70 Prozent aller Kameruner diese veralteten Herde. Der Weltgesundheitsorganisation WHO zufolge sterben weltweit jährlich rund 4,3 Millionen Menschen an den Folgen schlechter Luftqualität in Innenräumen. Hauptverantwortlich sind dabei Holzherde.

Die Briketts haben nun internationale Beachtung gefunden. Auf dem Weltklimagipfel 2016 in Marokko wurde Müller Nan-

in Kohle: Zunächst wird gesammelt und getrennt, dann getrocknet, mit wenig Sauerstoff verbrannt – und das so produzierte Kohlepulver schließlich in Brikettform gepresst.

Während der Verbrennung entsteht wesentlich weniger CO<sub>2</sub> als bei traditioneller Holzkohleproduktion, also schont die »grüne« Kohle nicht nur die Mangroven, son-

dern auch das Klima. »Außerdem ist unser Prozess billiger, deswegen können wir die Briketts auch günstiger anbieten«, ergänzt der Kameruner. Während Brennholz, das für die Zubereitung von nur einer Mahlzeit reicht, umgerechnet rund 90 Eurocents kostet, können die Menschen mit einem Paket Briketts, das 75 Cents kostet, gut zwei Tage lang auskommen. Zu Nandous Kun-

dou als »Bester Grüner Unternehmer« ausgezeichnet. Mit neuen Maschinen will Ke mit eine Jahresproduktion an Biokohle von rund 240 Tonnen erreichen. Doch auch damit dürfte diese Firma allein nur einen bescheidenen Beitrag leisten: Allein in Kamerun beträgt der Jahresbedarf an Holzkohle etwa 375 000 Tonnen.

### **Tansania: Bauen mit Plastik**

Auch für Tansania ist die Abholzung ein Problem. Die Bevölkerung wächst jährlich um drei Prozent. Kommunale Grüngebiete können der Entwicklung nicht standhalten. Laut einer Studie der Vereinten Nationen, die sich mit internationaler Entwaldung zwischen den Jahren 1990 und 2010 befasst, belegt der ostafrikanische Staat weltweit den sechsten Platz in einer Rangliste, die den Nettoverlust von Waldflächen aufweist. Zugleich ist die Nachfrage nach Holz groß. Oft bleibt den Menschen keine Alternative, als Baumaterial oder Brennholz aus den zahlreichen Naturschutzgebieten zu stehlen.

Doch nach Einschätzung von Christian Mwijage ist dies nicht das einzige Problem Tansanias: »Ich denke auch, dass wir ein gewaltiges Problem mit Plastikmüll haben.«

Mwijage lebt in Daressalam, der größten Stadt des Landes, mit einer ständig wachsenden Population von derzeit vier Millionen Menschen. »Überall wird mit Holz gebaut, überall ist Plastikmüll«, sagt er.

Dieses chaotische Stadtbild von Daressalam brachte Mwijage auf eine Idee: den Plastikmüll in Baumaterial zu verwandeln und damit gleichzeitig den Holzverbrauch zu verringern. »Ich machte mir Gedanken über den Bauboom und die Müllhalden und fand einen Weg, beide Probleme anzugehen.«

So gründete Mwijage Ende 2015 seine Firma EcoAct Tanzania. Seitdem beschäftigt der Jungunternehmer vor allem Menschen aus den ärmeren Vierteln Daressalams, um Plastikmüll, besonders Flaschen, zu sammeln, zu trennen und zu säubern. EcoAct zahlt sogar die Krankenversicherung für die Kinder der Stadt, wenn diese dafür wöchentlich das gesammelte Recycling ihrer Familien bei der Firma abliefern.

Der Müll wird dann zu feinem Plastikstaub zerkleinert und in Kunststoffbalken gepresst, was EcoAct als »Plastic Lumber« anpreist, als »Plastikbauholz«. Die Balken können zum Beispiel als Träger im Hausbau, als Zaunpfosten oder Ständer verwendet werden. Die Ökobalken sind günstiger



»Ich denke auch, dass wir ein gewaltiges Problem mit Plastikmüll haben«

[Christian Mwijage]



als Holz, ziehen außerdem keine Insekten an und verrotten nicht. »Wir produzieren derzeit 70 bis 80 Balken pro Tag, hoffen aber, demnächst mit modernisierter Maschinerie auf eine Tagesproduktion von bis zu 400 Balken zu kommen«, sagt Mwijage. Sein Konzept wurde unlängst mit dem Unternehmerpreis 2017 des Africa Finance and Investment Forum in Nairobi ausgezeichnet.

### **Nigeria: Kunsthandwerk mit Flussunkraut**

Recycling bietet auch eine Chance für kleine, mittellose Landgemeinden auf dem Kontinent, ihr eigenes Einkommen zu schaffen und so Wege aus der Armut zu finden. Ein Projekt in Nigeria bietet nicht nur das, sondern bekämpft gleichzeitig auch noch eines der gefährlichsten Unkräuter des Kontinents. Die aus Südamerika eingeschleppte Wasserhyazinthe ist ein Alp-

### **WASSERHYAZINTHEN, SO WEIT DAS AUGEN REICHT**

**Die invasive Art hat sich in zahlreichen Ländern der Welt ausgebreitet. Eine kommerzielle Verwertung – zum Beispiel für Flechtereien – könnte ihrem Vormarsch Einhalt gebieten.**

»Wir reduzieren Armut, bieten den Menschen anständige Arbeit, helfen Frauen und Jugendlichen und entfernen Behinderungen für den Transport«

[Achenyo Idachaba]

traum für die Menschen, die entlang der Flüsse leben. Weil das Wassergewächs in Afrika keine Fressfeinde hat, wuchert es buchstäblich die Wasserwege des Kontinents zu. Eine Wasserhyazinthendecke verdoppelt ihre Fläche in nur zwei Wochen. Das ist besonders dramatisch für die Fischerei und die Schifffahrt. Andere Pflanzen und Fische sterben aus Mangel an Licht und Sauerstoff. Boote können nicht ungestört navigieren. Krokodile finden mehr Möglichkeiten, aus der Tarnung der Hyazinthen heraus Opfer anzugreifen. Außerdem verringern die Pflanzen die Fließgeschwindigkeit der Flüsse, es kommt zu Schlammablagerung.

Zwar gibt es in Nigeria Maßnahmen, die Hyazinthen groß angelegt mit Pestiziden und Maschinerie zu bekämpfen, doch das hilft kleinen Gemeinden meist nur wenig. Die Unternehmerin Achenyo Idachaba hat mit ihrer Firma MitiMeth nun einen Weg gefunden, gleich mehrere dieser Probleme anzugehen.

Idachaba bezahlt Geld für die Pflanzen. Das motiviert die Menschen, das Unkraut aus dem Wasser zu entfernen und bietet speziell den Fischern einen anständigen Nebenverdienst. Die Nigerianerin trocknet

und presst dann die Stängel der Pflanzen und enthält so ein sehr robustes und dehnbares Material für ihre Produkte. »Wir stellen hier Hausmöbel, Körbe, Lampenschirme, Materialien für die Küche, Matten, Notizblöcke und vieles mehr her«, sagt sie.

In den vergangenen zwei Jahren hat Idachaba mehr als 25 Tonnen Wasserhyazinthen verwertet und damit Menschen zu einem Einkommen verholfen und Nigerias Wasserwege etwas sauberer gehalten. »Mein Projekt erfüllt gleich fünf ›Ziele für Nachhaltige Entwicklung‹«, betont die Unternehmerin. Die 17 von den Vereinten Nationen formulierten und im Januar 2016 in Kraft getretenen Ziele sollen das Leben für Menschen in Entwicklungsländern bis 2030 nachhaltig verbessern. »Wir reduzieren Armut, bieten den Menschen anständige Arbeit, helfen Frauen und Jugendlichen und entfernen Behinderungen für den Transport«, zählt Idachaba auf. Und ihr Projekt trägt sogar zum Kampf gegen den Klimawandel bei, denn wenn Wasserhyazinthen verrotten, produzieren sie klimaschädliches Methan. ↩

(Spektrum – Die Woche, 23/2017)

Spektrum  
der Wissenschaft

DIE WOCHE

NR

23

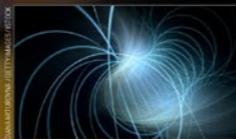
07.06.  
2018

- > Plutosonde ist erfolgreich auf dem Mars
- > Aggressive Guppys wechseln die Augenfarbe
- > Spektakuläre Marsfunde: Organische Moleküle und ein Quäntchen Methan

TITELTHEMA: TRINGEGWOHNHEITEN

## Wie viel Alkohol ist gesundheitlich unbedenklich?

Wer maximal 100 Gramm Alkohol pro Woche zu sich nimmt, müsse nicht mit bleibenden Schäden rechnen, so ein Befund im Fachblatt »The Lancet«. Doch der Grenzwert trägt.



QUANTENGRAVITATION

Neues Leben für eine alte Theorie von Allem



MARSHMALLOW-TEST

Wurde das berühmte psychologische Experiment falsch interpretiert?



WILDTIERSCHUTZ

Leben hinter drahtlosen Zäunen

Mit ausgewählten Inhalten aus **nature**

Im Abo nur  
**0,92 €**  
pro Ausgabe

Jetzt bestellen!  
**Das wöchentliche  
Wissenschaftsmagazin**  
als Kombipaket im Abo:  
Als App und PDF

HIER ABONNIEREN!

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 €.