

---

# Frankfurter Rundschau



AFP



KLIMA RETTEN  
[www.fr.de/kippunkte](http://www.fr.de/kippunkte)

Alle Texte aus der FR-Serie 2020

## IMPRESSUM

Die Frankfurter Rundschau erscheint im Verlag der Frankfurter Rundschau GmbH.  
Chefredaktion: Thomas Kaspar, Michael Bayer (Stellv.), Karin Dalka (Stellv.)

Ressortleitungen: Politik/Panorama: Nadja Erb (Stellv.) Meinung: Andreas Schwarzkopf,  
Wirtschaft und Innovationsmanagement: Daniel Baumann, Sport: Jörg Hanau,  
Feuilleton: Christian Thomas, Frankfurt, Freizeit & RheinMain: Stefan Kuhn,  
Georg Leppert (Stellv.)

Chef vom Dienst: Claudia Nenninger, Stefan Affentranger

Leitende Redakteure: Lutz Fischer, Claus-Jürgen Göpfert, Peter Hanack, Pitt von Bebenburg,  
Jan-Christian Müller

Redaktion: Frankenallee 71-81, 60327 Frankfurt am Main, Telefon 069/2199-1

Verlag: Frankenallee 71-81, 60327 Frankfurt am Main, Tel. 069/2199-1

(zugleich auch ladungsfähige Anschrift für die im Impressum genannten Verantwortlichen  
und Vertretungsberechtigten)

Internet: [www.fr.de](http://www.fr.de)

Geschäftsführer: Dr. Max Rempel

Verantwortlich für Anzeigen: Achim Pflüger, RheinMainMedia GmbH, Frankenallee 71-81,  
60327 Frankfurt am Main, Telefon 069 / 7501 – 33 36, Fax 069 / 7501 – 4105.

RMM-Anzeigenpreisliste Nr. 25, gültig vom 1. Januar 2020 an.

Erscheint täglich außer sonntag feiertags. Monatsbezugspreis Inland: Trägerzustellung und  
Postbezug im gesamten Bundesgebiet 53,95 Euro; ermäßigter Bezugspreis für Studierende  
und Auszubildende (gegen Vorlage einer Bescheinigung) 27,95 Euro. Digitalabonnement  
34,95 Euro; ermäßigter Bezugspreis für Studierende und Auszubildende (gegen Vorlage  
einer Bescheinigung) 27,95 Euro; Alle Preise inkl. 7% Umsatzsteuer. Monatsbezugspreis  
Ausland: auf Anfrage.

Bei Nichtlieferung ohne Verschulden des Verlages oder infolge höherer Gewalt keine Ent-  
schädigung. Für unverlangte Einsendungen übernehmen wir keine Verantwortung. Eine  
Verwertung der urheberrechtlich geschützten Zeitung und aller in ihr enthaltenen Beiträge  
sowie Abbildungen, insbesondere durch Vervielfältigung und/oder Verbreitung, ohne  
vorherige schriftliche Zustimmung des Verlages ist unzulässig und strafbar. Insbesondere ist  
die Einspeicherung und/oder Verarbeitung der auch in elektronischer Form vertriebenen  
Zeitung in Datenbanksystemen ohne Zustimmung des Verlages unzulässig. Alle Rechte  
vorbehalten. Druck: Frankfurter Societäts-Druckerei GmbH & Co. KG, Kurhessenstraße  
4-6, 64546 Mörfelden-Walldorf. Gerichtsstand: Frankfurt am Main.

Verleger bis 1973: Karl Gerold.

Die Frankfurter Rundschau GmbH (FR), hat die Erhebung, Verarbeitung und Nutzung der  
Abonentendaten und sonstiger personenbezogener Daten aus ihrem Geschäftsbetrieb  
zu den jeweiligen vertraglichen Zwecken an die Frankfurter Allgemeine Zeitung GmbH,  
Hellerhofstraße 2-4, 60327 Frankfurt am Main übertragen. Der Zustelldienst ist an die  
Medienservice GmbH & Co. KG, Hellerhofstraße 2-4, 60327 Frankfurt am Main und weitere  
Zustellpartner übertragen, die hierfür von der FR die personenbezogenen Daten der Abon-  
nenten erhalten. Betroffenenrechte wie das Recht auf Auskunft oder Löschung können stets  
gegenüber der FR geltend gemacht werden.

Die Inhalte dieser Zeitschrift werden in gedruckter und digitaler Form vertrieben und sind  
aus Datenbanken abrufbar. Eine Verwertung der urheberrechtlich geschützten Inhalte ist  
ohne vorherige schriftliche Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar, sofern sich  
aus dem Urheberrechtsgesetz nichts anderes ergibt.

© Alle Rechte vorbehalten. Frankfurter Rundschau GmbH.

Es ist nicht gestattet, die Inhalte zu vervielfältigen, zu ändern, zu verbreiten, dauerhaft zu  
speichern oder nachzudrucken. Insbesondere dürfen die Inhalte nicht zum Aufbau einer  
Datenbank verwendet oder an Dritte weitergegeben werden. Vervielfältigungs- und Nut-  
zungsrechte können unter [nutzungsrechte@fr.de](mailto:nutzungsrechte@fr.de) oder 069 / 7591-2986 erworben werden.  
Nähere Informationen erhalten Sie unter [www.fr-rechte.de](http://www.fr-rechte.de).

## Inhalt

Schmelzen des arktischen  
Meereises, des grönländischen und  
des antarktischen Eisschildes

**Seite 4**

Absterben der tropischen  
Korallenriffe

**Seite 8**

Methanfreisetzung durch tauende  
Permafrostgebiete

**Seite 10**

Abschwächung des Golfstroms

**Seite 12**

Ergrünen der südlichen Sahara,  
Verlagerung des westafrikanischen  
Monsuns

**Seite 14**

Störungen des Wetterphänomens  
El Niño

**Seite 16**

Destabilisierung des  
indischen Monsuns

**Seite 18**

Austrocknen des Amazonas-  
Regenwalds, Rückgang der  
borealen Wälder

**Seite 20**

Abschwächung der marinen  
„Kohlenstoffpumpe“

**Seite 22**

Verlangsamung oder Einrasten  
der Wellen des Jetstreams

**Seite 24**

Austrocknen des nordamerikanischen  
Südwestens

**Seite 26**

Abschluss der Serie: Interview mit  
Hans Joachim Schellnhuber,  
dem früheren Direktor des Potsdam-  
Instituts für Klimafolgenforschung

**Seite 28**

Die Weltgemeinschaft hat 2015 im Paris-Abkommen beschlossen: Die Erderwärmung soll bei zwei Grad gestoppt werden, besser aber bei 1,5 Grad. Diese Grenze ist nicht willkürlich gewählt, doch die Gründe dafür sind in der Öffentlichkeit wenig bekannt.

Wird sie überschritten, droht eine Eskalation der Klimakrise, vor der Wissenschaftler warnen. Das Problem: Werden bestimmte „Kippelemente“ im Klima- und Erdsystem ausgelöst, kann es zu Kettenreaktionen kommen, durch die sich die Erwärmung unkontrollierbar verstärken würde. Es droht dann eine „Heißzeit“, bei der sich die Erde um vier bis fünf Grad erwärmen würde und die ein Ende der heutigen menschlichen Zivilisation mit sich brächte.

16 dieser Kippelemente, die bei unterschiedlichen Temperatur-Schwellenwerten ausgelöst werden, haben Wissenschaftler identifiziert. Die Palette reicht von den riesigen Eisschilden der Erde auf Grönland und in der Antarktis über die Permafrost-Böden, den Amazonas-Regenwald und den Golfstrom bis zum indischen Monsun.

Bei den Kippelementen handelt es sich „um die Achillesferse unseres Planeten“, sagte der frühere Direktor des Potsdam-Instituts für Klimafolgenforschung (PIK) und Regierungsberater, Professor Hans-Joachim Schellnhuber. Er warnt: „Wir sollten diese Kippschalter tunlichst nicht aktivieren.“ Kippen die Systeme, können die meisten davon nicht mehr in den alten Zustand zurückgeführt werden, selbst wenn die Menschheit auf einen Schlag emissionsfrei leben würde.

### Die Permafrostböden tauen auf und setzen Methan frei

Ein plastisches Beispiel dafür, wie das Umlagen eines „Schalters“ zum Beispiel die globale Erwärmung verstärken kann, ist das Auftauen der Permafrostböden, die ein Sechstel der Landfläche des Globus bedecken – in Sibirien, Alaska und Nordkanada. Die Erwärmung, die bisher global im Schnitt rund 1,1 Grad beträgt, hat

diesen Prozess bereits gestartet. Das Auftauen beschädigt nicht nur Gebäude und Straßen, es setzt auch große Mengen der Treibhausgase CO<sub>2</sub> und Methan frei. Allein im obersten Bereich der Permafrostböden stecken rund 1500 Milliarden Tonnen Kohlenstoff und damit rund doppelt so viel, wie es derzeit in der gesamten Erdatmosphäre gibt. Einmal in Gang gesetzt, lässt sich ein sich selbst verstärkender Auftauprozess nicht mehr stoppen – und riesige Mengen Klimagas werden frei. Das wäre dann ein Turbo für die Erwärmung.

### Der Wald wandelt sich zu einer CO<sub>2</sub>-Quelle

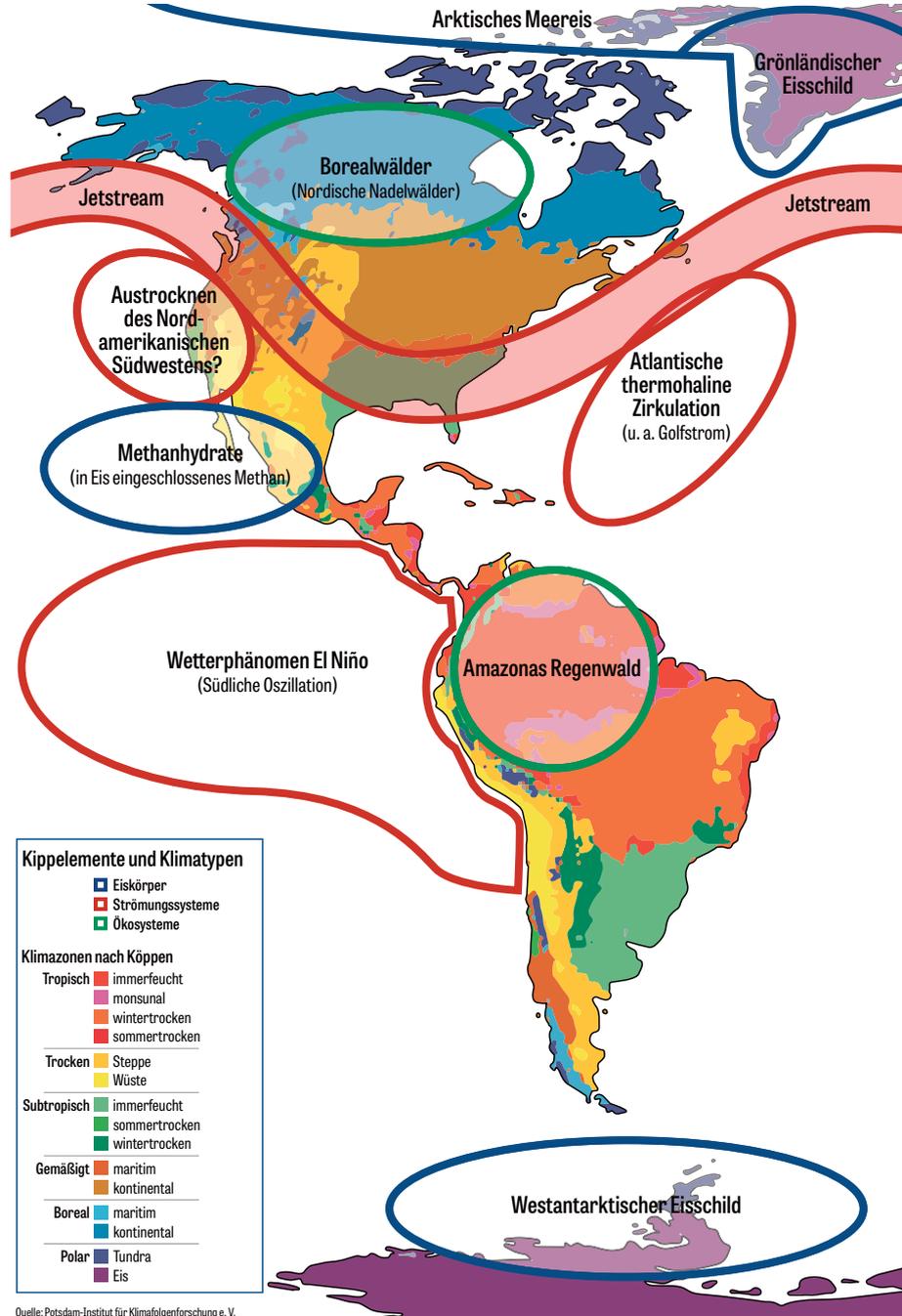
Ähnlich gravierende Folgen für die Treibhausgas-Bilanz drohen, wenn der Amazonas-Regenwald austrocknet und die borealen Wälder im Norden, etwa in Nordkanada und in der russischen Taiga, weiter vernichtet werden. In ihnen sind ebenfalls riesige Mengen Kohlenstoff gespeichert, die dann zusätzlich in die Atmosphäre gelangen und der Aufheizung des Planeten einen Schub geben würden. Der Wald wandelt sich dann von einem CO<sub>2</sub>-Speicher in eine CO<sub>2</sub>-Quelle.

Die Warnungen vor den Kippunkten sind nicht neu. Bereits in den 1980er Jahren war den Klimawissenschaftlern klar, dass bei einem unbegrenzten Wachstum der Emissionen tiefgreifende Veränderungen im Klimasystem drohen. Jüngste Forschungen zeigen, dass der Zeitpunkt, an dem die Folgen der Klimaveränderungen nicht mehr aufzuhalten sind, schneller erreicht werden könnte als angenommen.

Eine Gruppe von führenden Forschern warnte Ende vorigen Jahres im renommierten Fachjournal „Nature“, dass bei mehr als der Hälfte der 16 Kippelemente das „Umlagen des Schalters“ bereits gefährlich nahe sei. Der Hauptautor des Kommentars, Timothy Lenton, warnte vor einer „planetaren Notsituation“. Es liegt womöglich nicht mehr in unserer Hand, das Erdsystem vor einem Umkippen in einen neuen Zustand zu bewahren, meint der Direktor des Instituts für globale Systeme an der Universität Exeter in Großbritannien.

Die Forscher haben ausgerechnet, wie viel Treibhausgase die Weltgemeinschaft noch in die Atmosphäre emittieren darf, um das Sicherheitslimit von 1,5 Grad plus mit einer 50-Prozent-Chance halten zu können. Es sind rund 500 Milliarden Tonnen.

Diese Menge wäre bereits erschöpft, wenn nur der aktuelle globale CO<sub>2</sub>-Ausstoß von jährlich mehr als 40 Milliarden Tonnen noch zwölf Jahre lang auf diesem Niveau bliebe. Die zusätzlichen Emissionen aus den Permafrostböden und der Entwaldung könnten laut der Wissenschaftlergruppe um Lenton zusammen bis zu 300 Milliarden Tonnen betragen, falls das Erreichen der Kippelemente tatsächlich bereits kurz bevorsteht – 100 Milliarden durch



### DIE SERIE

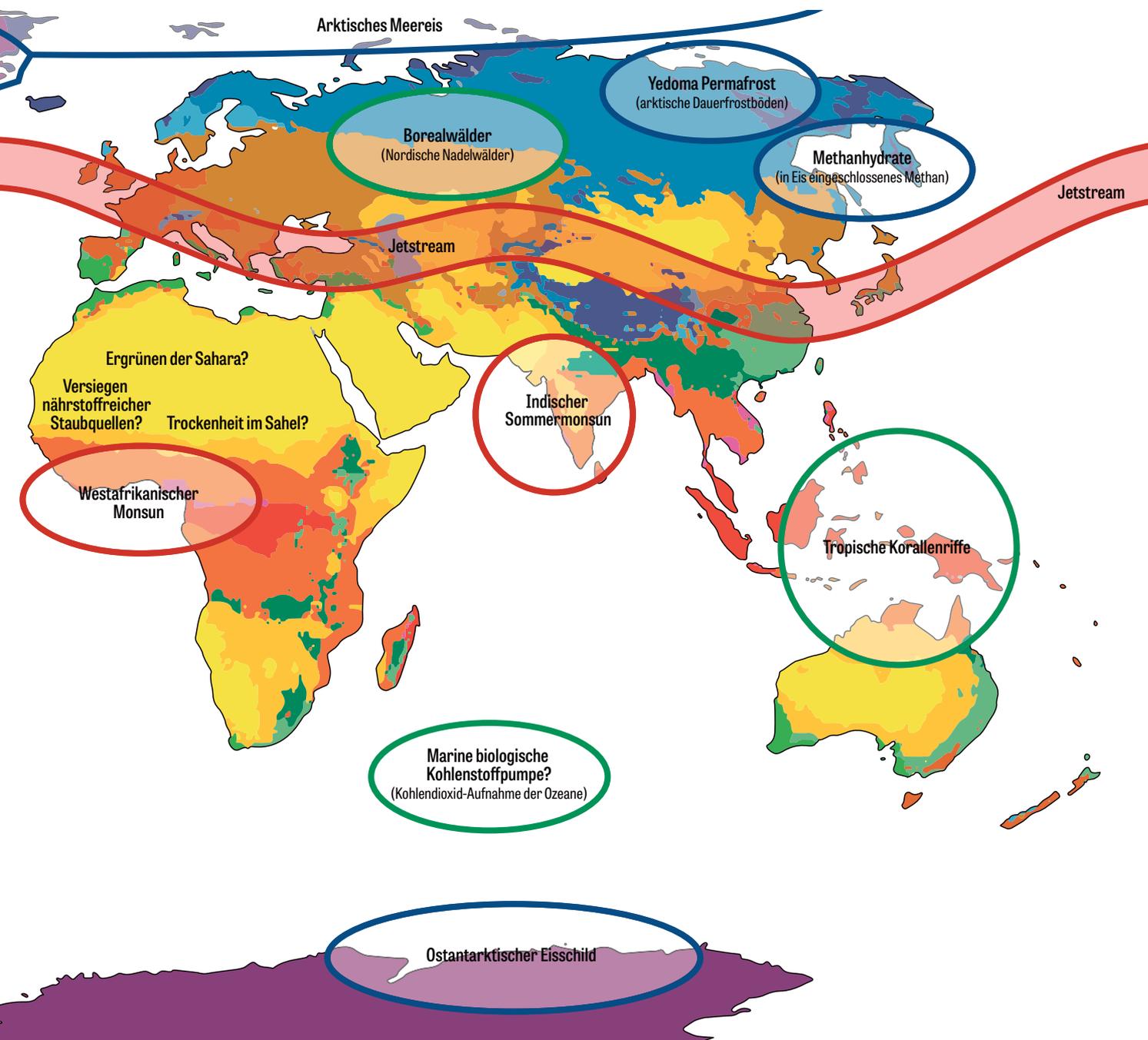
Das Klima kann sich abrupt ändern. Wenn bestimmte Kippunkte überschritten werden – wenn etwa der Amazonas-Regenwald austrocknet oder die Permafrostböden tauen –, kann es zu Kettenreaktionen kommen. Die Erderwärmung könnte sich dann unkontrollierbar verstärken. Doch noch können wir bei den meisten Kippelementen verhindern, dass sie ausgelöst werden. Wie, das stellt die FR im Rahmen einer neuen Serie vor: Von heute an berichten wir zwölf Wochen lang jeden Freitag über die Kippelemente der Erde – und fragen, was wir tun können, um das Klima zu retten. th

## Der Mensch

# verliert die Kontrolle

Die Klimaschutzziele der Regierungen reichen nicht aus, um eine gefährliche Kettenreaktion zu verhindern

Von Joachim Wille



ein abruptes Tauen im Permafrost und 200 Milliarden aus dem Absterben oder Abbrennen der Wälder am Amazonas und in den nördlichen Breiten. In dem „Nature“-Kommentar heißt es dazu: Zusammen mit den sonstigen Emissionen „könnte das verbliebene Budget bereits ausradiert sein“. Das heißt konkret: Das 1,5-Grad-Limit müsste jetzt praktisch schon abgeschrieben werden.

Wegen dieser Aussichten halten die Forscher es für entscheidend, den im Paris-Abkommen festgelegten Kurs der Emissionsminderung bis zur Klimaneutralität nicht aufzugeben. Denn: Selbst wenn einige der Kipp-

elemente nicht mehr zu stabilisieren seien, so sei es doch möglich, die Kettenreaktionen zu verlangsamen. Die Experten erklären das am Beispiel des Meeresspiegelanstiegs.

#### In diesem Jahr müssen die Staaten neue Ziele vorlegen

Möglicherweise sei ein Anstieg um zehn Meter in den nächsten Jahrtausenden bereits nicht mehr zu verhindern. Doch die Menschheit könnte beeinflussen, wie schnell es dazu kommt. Bleibt man im 1,5-Grad-Limit, würde es nach den Berechnungen 10000

Jahre dauern, bei zwei Grad wahrscheinlich weniger als 1000 Jahre.

Bisher allerdings sind die Regierungen der Welt noch weit davon entfernt, zwei, geschweige denn 1,5 Grad anzupeilen. Laut dem UN-Umweltprogramm Unep steuert die Erde auf plus 3,2 Grad bis 2100 zu, wenn die Staaten ihr bisher beschlossenes CO<sub>2</sub>-Ziel einhalten. Schaffen sie das nicht, droht sogar eine Erwärmung um bis zu 3,9 Grad. In beiden Fällen wäre ein Auslösen ethischer Kippelemente programmiert.

In diesem Jahr sollen die Regierungen bessere Klimaziele vorlegen. Ob die reichen werden, die Klimakrise zu bremsen, ist offen.

#### WELTKARTE DER KIPPELEMENTE

Es gibt eine ganze Reihe von Kippelementen. Wie viele es genau sind, ist noch nicht völlig erforscht. Über bestimmte Elemente sind sich die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aber einig.

Die Abbildung zeigt die 16 wichtigsten Kippelemente, die eine internationale Forschergruppe 2008 zusammengestellt hat; auch Wissenschaftler des Potsdam-Instituts für Klimafolgenforschung (PIK) waren daran beteiligt. Fragezeichen auf der Karte kennzeichnen Systeme, bei denen wissenschaftlich noch nicht ganz klar ist, ob sie tatsächlich Kippelemente sind oder nicht.

Als besonders gefährdet stuft eine internationale Forschergruppe um den britischen Klimawissenschaftler Timothy Lenton neun Kippelemente ein: Warmwasser-Korallen sterben ab; Meereis-Bedeckung der Arktis geht schnell zurück; Grönland-Eisschild geht taut; Eisschild der West-Antarktis beschleunigt; Permafrost-Böden tauen beschleunigt auf; Amazonas-Regenwald schrumpft; boreale Wälder im Norden leiden durch Waldbrände und Schädlingsbefall; Umwälzzirkulation im Atlantik („Golfstrom“) schwächt sich ab. thh/jw



Drohen Schanghai in Zukunft solche Bilder öfter?

DPA

## Wenn die Flut kommt, müssen ganze Städte weichen

Das Eis der Erde schmilzt, der Meeresspiegel steigt – und alles passiert immer schneller. Wissenschaftler fragen sich, ob dieser Prozess noch zu stoppen ist

Von Joachim Wille



Der Kölner Dom – zur Hälfte überflutet. Nur noch die Türme und das Kirchendach ragen aus den Nordsee-Fluten heraus. Mit diesem Horrorbild begann 1986 die Medienkarriere des Themas Klimawandel, auf dem Cover des Magazins „Der Spiegel“.

Dass das mächtige Bauwerk wegen der Erderwärmung tatsächlich einmal im Meerwasser steht, ist ein Extremszenario, das erst in Tausenden von Jahren eintreten könnte. So lange würde es dauern, bis alle Eismassen der Erde geschmolzen wären.

Völlig undenkbar ist das Szenario allerdings nicht mehr. Köln liegt im Schnitt 53 Meter über null, und das Wasser, das global im Eis gespeichert ist, würde den Meeresspiegel um 65 Meter ansteigen lassen.

Neue Forschungen zeigen, dass das Abschmelzen nicht nur bei den Gletschern auf den Bergmassiven, etwa in den Alpen, in den Anden oder im Himalaya,

sondern auch bei den großen Eismassen der Erde bereits irreversibel eingesetzt haben könnte – bei den Eisschilden auf Grönland und am Südpol. Beide gelten als „Kippelemente“ des Erdsystems. Werden diese ausgelöst, gibt es kein Zurück mehr.

In der Öffentlichkeit am besten bekannt ist die Situation am Nordpol. Das arktische Meereis schwindet rasant – die Ausdehnung und vor allem auch die Dicke des Eises gehen zurück.

**Die zentrale Arktis könnte 2040 im Sommer eisfrei sein**

Im September 2019 erreichte die Fläche mit nur 3,9 Millionen Quadratkilometern die zweitkleinste seit Beginn der Satellitenmessungen im Jahr 1979. Dünnes Eis baut sich zwar in kalten Jahren schnell wieder auf, es ist jedoch sehr empfindlich gegenüber warmen Sommern. Wissenschaft-

ler rechnen damit, dass die zentrale Arktis etwa ab 2040 im Sommer weitgehend eisfrei und damit schiffbar sein wird, falls die globalen Emissionen auf dem derzeitigen Stand bleiben.

Hauptgrund dafür ist, dass die Erderwärmung in den nördlichen Breiten etwa doppelt so schnell verläuft wie im globalen Durchschnitt. Während der Globus in den letzten 100 Jahren etwa ein Grad wärmer geworden ist, sind es in den nördlichen Breiten über zwei Grad, so das Alfred-Wegener-Institut in Bremerhaven, das auf Spitzbergen eine Dauer-Messstation unterhält. Man spricht von der „arktischen Verstärkung“.

Schmelzendes Eis verstärkt dabei die Erwärmung, weil die freigelegte dunklere Meeresoberfläche mehr Sonnenwärme als das Eis aufnimmt und an die Atmosphäre abgibt, was wiederum den Schwund des restlichen Eises beschleunigt. Der Mechanismus gilt als klassisches Beispiel eines

selbstverstärkenden Prozesses: Ein und dasselbe Phänomen, nämlich der Eisverlust, ist sowohl Folge als auch ein Teil der Ursache der Temperaturerhöhung.

Diese „Eis-Albedo-Rückkopplung“ spielt auch eine große Rolle beim Eisverlust in Grönland, der in den letzten Jahren durch ins Meer fließende Gletscher und verstärktes Abschmelzen im Sommer stark zugenommen hat. Der Eisschild, der stellenweise drei Kilometer dick ist, enthält 2,6 Millionen Kubikkilometer Wasser. Schmilzt er komplett ab, würde das den Meeresspiegel über Jahrhunderte oder Jahrtausende um sieben Meter anheben.

Inzwischen gibt es Hinweise, dass das Grönland-Eis seinen Kippunkt bereits erreicht haben könnte. US-Forscher fanden 2018 heraus, dass der jährliche Eisverlust im letzten Jahrzehnt teilweise viermal so hoch war wie 2003, in der Spitze waren es 400 Milliarden Tonnen.

## Leser fragen

### Wenn wir den Ausstoß von CO<sub>2</sub> jetzt stoppen, geht die Erwärmung dann weiter?

Joachim Wille antwortet:

Die Erwärmung würde nur geringfügig weitergehen oder sich sogar verringern. Wie stark das Klimasystem verändert wird, lässt sich also durchaus beeinflussen. Deswegen macht es einen großen Unterschied, ob die Weltgemeinschaft das „Sicherheitslimit“ von zwei, besser aber 1,5 Grad Erwärmung einhält. Seit Beginn der industriellen Revolution hat sich die CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Atmosphäre bereits von 280 ppm (Teile pro Million Teile Luft) auf über 410 ppm erhöht. Würde der CO<sub>2</sub>-Ausstoß nun mit einem Schlag auf null gesenkt, würde die Oberflächentemperatur sich kaum noch erhöhen oder sogar sinken, weil die natürlichen CO<sub>2</sub>-„Senken“ – die Meere und die Landregionen – das Gas aus der Luft aufnehmen würden. Oft zitiert in dieser Diskussion wird die Modellrechnung des Weltklimarats IPCC für den Fall, dass die CO<sub>2</sub>-Konzentration auf dem heutigen Niveau stabil bliebe. Dann würde die Erwärmung noch für Jahrhunderte fortschreiten – bis 2100 etwa um rund 0,6 Grad gegenüber 2000. Danach würde sich der Erwärmungstrend abflachen. Der Grund liegt in der Trägheit der Wärme aufnehmenden Ozeane, die Zeit benötigen, um mit der Erwärmung der Atmosphäre ins Gleichgewicht zu kommen. Heute beträgt die Erderwärmung rund 1,1 Grad gegenüber der vorindustriellen Zeit. Das heißt: Es liegt an uns, wie nahe die Erde an die 1,5- oder die Zwei-Grad-Schwelle herankommt. Der IPCC hält ab 2020 eine jährliche Verminderung der Emissionen um über sieben Prozent für nötig, um die Chance auf die 1,5 Grad zu wahren.

Ein Grund dafür ist, dass auch das grönländische Inlandeis zu schmelzen begonnen hat – aufgrund eines Wetterphänomens, der „nordatlantischen Oszillation“, die in Abständen warme Luftströmungen in die West-Antarktis leitet, sich inzwischen aber mit der globalen Erwärmung überlagert.

**„Die einzige Frage ist: Wie schlimm wird es?“**

„Wir werden auf absehbare Zeit einen immer schnelleren Meeresspiegelanstieg erleben“, sagt der Wissenschaftler Michael Bevis von der Ohio State University. „Sobald wir den Wendepunkt erreicht haben, ist die einzige Frage: Wie schlimm wird es?“ Klimamodelle hatten den Kipppunkt für den Grönland-Eisschild erst bei zwei Grad plus errechnet. In der Antarktis sind die Eismassen noch gigantischer. Ihr komplettes Abschmelzen würde den Meeresspiegel sogar um 58 Meter anheben. Lange galten die Eisschilde im Westen und Osten des „weißen Kontinents“ als relativ ungefährdet. Das hat sich geändert. Klimaforscher befürchten, dass das Abtauen der größten Gletscher der West-Antarktis, des Pine-Island- und des Thwaites-Gletschers, bereits irreversibel ist. Diese beiden allein würden drei Meter plus beim Meeresspiegel bringen – und zwar im Laufe der nächsten 200 bis 900 Jahre. Aber auch die Eisschmelze in der östlichen Antarktis, wie eine NASA-Studie Ende 2018 zeigte.

Bisher hat sich der Meeresspiegel durch die Erderwärmung um rund 25 Zentimeter erhöht, bis 2100 könnte der Anstieg laut dem Weltklimarat IPCC bis zu 110 Zentimeter betragen.

Sind die Kippelemente erst einmal aktiviert, werden künftige Generationen mit ganz anderen Dimensionen konfrontiert sein. Die Küstenregionen werden nicht mehr bewohnbar sein, Metropolen wie New York, Schanghai oder Rotterdam müssten aufgegeben werden. „Wir denken oft, dass uns beim Verlust von Eis in der Antarktis das Schlimmste noch bevorsteht“, kommentiert Professor Anders Levermann vom Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung. „Das stimmt auch. Aber es scheint, dass dieses Schlimmste bereits in Gang gesetzt wurde.“

## Die Falschen tragen die Kosten

Warum Preise für CO<sub>2</sub>-Emissionen helfen, das Klima zu schützen

VON JÖRG STAUDE UND JOACHIM WILLE

Die Preise müssen die ökologische Wahrheit sagen: Diese Maxime, in den 90er Jahren von Umweltforscher Ernst Ulrich von Weizsäcker formuliert, ist so einleuchtend wie mangelhaft umgesetzt. Besonders im Bereich der fossilen Energien ist das überraschend. Die Umwelt- und Klimaschäden, die das Verfeuern von Kohle, Erdöl und Erdgas weltweit verursacht, werden nicht oder nur teilweise den Käufern dieser Energien in Rechnung gestellt. Die Allgemeinheit sowie kommende Generationen müssen sie tragen. Ein Irrwitz, die Wirtschaft kann so nicht richtig funktionieren. Das Ergebnis ist ein sich aufheizendes Klima, bedingt durch Dumpingpreise.

Tatsächlich wird die Klimakrise von den Regierungen noch verstärkt – durch Subventionen für Öl, Kohle und Gas. Der Internationale Währungsfonds (IWF) beziffert sie weltweit auf 5,3 Billionen Dollar jährlich. Das hält die Energiepreise künstlich niedrig und bremst den Ausbau der erneuerbaren Energien. Bereits der Abbau dieser Subventionen würde viel bringen. Die Öko-Investitionen würden steigen, und allein dadurch könnten die globalen Treibhausgas-Emissionen um 17 Prozent sinken, so der IWF.

Den CO<sub>2</sub>-Emissionen ein Preisschild anzuhängen, ist eine alte Forderung von Umweltökonomien. Sie setzte sich zunächst nur langsam durch, doch inzwischen hat sie international und

national viele und gewichtige Fürsprecher. Institutionen wie die Weltbank oder eben der IWF drängen darauf, auch immer mehr Staaten steigen ein. Zuletzt rang sich sogar die deutsche Bundesregierung dazu durch, einen nationalen CO<sub>2</sub>-Aufschlag für Verkehr und Heizen einzuführen.

Vorreiterin bei der CO<sub>2</sub>-Bepreisung war die EU, die 2005 unionsweit einen Emissionshandel für Kraftwerke und Industrie einführte. Inzwischen gibt es solche Systeme in einer Reihe von Staaten und Regionen, etwa in Kanada, Südkorea und Kalifornien. Auch China will demnächst eins einführen.

**Die Reform der Bepreisung auf EU-Ebene zeigt Wirkung**

Lange krankte der EU-Emissionshandel daran, dass der Preis wegen zu üppig ausgegebener CO<sub>2</sub>-Lizenzen so niedrig war, dass er keine Wirkung zeigte. Seit dem Frühjahr 2019 kostet die Tonne CO<sub>2</sub> nach Reformen nicht mehr wie früher nur fünf oder acht, sondern etwa 25 Euro. Das hat Folgen: In Deutschland sank der Anteil der Kohle an der Stromproduktion 2019 deutlich.

Wie hoch der CO<sub>2</sub>-Preis tatsächlich sein müsste, um die ökologische Wahrheit zu sagen, berechnet das Umweltbundesamt regelmäßig. Derzeit belaufen sich die Klima-, Gesundheits- und Umweltschäden pro Tonne CO<sub>2</sub> auf rund 180 Euro. Daran gemessen liegen die Preise im EU-Han-

del also noch viel zu niedrig, ebenso die, die die Bundesregierung ab 2021 für Verkehr und Gebäudeheizung vorsieht – 25 Euro pro Tonne. Andere Länder wie die Schweiz und Schweden haben bereits deutlich höhere CO<sub>2</sub>-Preise, nämlich 90 beziehungsweise 115 Euro je Tonne.

Verfechter eines CO<sub>2</sub>-Preises fordern, dass die Einnahmen nicht im Staatshaushalt verschwinden, sondern an die Bürger zurückgegeben werden – etwa in Form eines jährlich auszuhaltenden Klimabonus. In der Schweiz zum Beispiel fließen zwei Drittel der Einnahmen in Form einer Gutschrift für die Krankenversicherung an jeden Bürger zurück – derzeit sind das pro Kopf umgerechnet etwas mehr als 70 Euro im Jahr. Wer wenig Energie verbraucht, profitiert dadurch. In Deutschland wird ein anderes Konzept verfolgt: Hier werden die Einnahmen genutzt, um die EEG-Umlage zu senken und die Pendlerpauschale zu erhöhen. Das bevorteilt einkommensstärkere Haushalte.

Die CO<sub>2</sub>-Bepreisung allein ist freilich kein Allheilmittel. Wie hoch der Preis auch ist, ein Teil der Bevölkerung wird sich zum Beispiel das Fliegen weiter leisten können. Zudem besteht wegen der Rückzahlung der Steuer an die Bürger die Gefahr, dass das Geld für klimaschädliche Produkte oder Aktivitäten ausgegeben wird. Alternativ könnte ein Teil der Einnahmen gezielt in die Klimaschutz-Förderung investiert werden.



Würden die ökologischen Kosten miteinberechnet, wäre Kohlestrom wesentlich teurer.

STRATENSCHULTE/DPA



Ausgeblichene, weiße Korallen am australischen Great Barrier Reef: Bei Temperaturen über 30 Grad verenden die Tiere.

MIA HOOGENBOOM/ARC CENTRE OF EXCELLENCE FOR CORAL/AFIP

## Wenn die Korallen sterben, sterben die Küsten

Die Nesseltiere ernähren unzählige Tierarten und den Menschen, doch sie sind stark gefährdet

Von Joachim Wille



### DIE SERIE

**Das Klima kann sich abrupt ändern.** Wenn bestimmte Kippunkte überschritten werden – wenn etwa der Amazonas-Regenwald austrocknet oder die Permafrostböden tauen –, kann es zu Kettenreaktionen kommen. Die Erderwärmung könnte sich dann unkontrollierbar verstärken. Doch noch können wir bei den meisten Kippelementen verhindern, dass sie ausgelöst werden. Wie – das stellt die FR in dieser Serie vor. Mehr Informationen zur Serie finden Sie auf [fr.de/kipppunkte](http://fr.de/kipppunkte)

Das Great Barrier Reef vor Australiens Nordost-Küste zählt zum Unesco-Weltnaturerbe. Mit einer Länge von 2300 Kilometern ist das „Weltwunder der Natur“ das größte Korallenriff der Welt, ein einzigartiger Unterwasser-Kosmos voller Leben, Farben und Formen. Delfine, Rochen, Clownfische, Feuerfische, Meeresschildkröten und viele andere Meerestiere leben hier. Doch es steht schlecht um dieses Wunder.

Das Riff ist bedroht. Aktuelles Beispiel: Die Adami-Kohlemine, die im Bundesstaat Queensland eröffnet werden soll und wegen der der Siemens-Konzern jüngst in die Schlagzeilen kam, könnte stark zum Sterben des Riffs beitragen. Künftig werden jährlich Hunderte Kohleschiffe zusätzlich vom dann ausgebauten Exporthafen Abbot Point ihren Weg durch das Great Barrier Reef nehmen, um die Kohle nach Indien zu liefern, wo sie in Kraftwerken verfeuert werden soll.

Es wäre eine weitere Attacke auf das Riff, neben Belastungen durch die Wasserverschmutzung, die zunehmende Versauerung der Ozeane, den Tourismus – und vor allem die Aufheizung des Meerwassers durch den Klimawandel.

Wird das Wasser über 30 Grad Celsius warm, schädigt das die Algen, die auf den Korallen siedeln und für deren Überleben notwendig sind. Es kommt zur gefürchteten Korallenbleiche, und übrig bleibt dann von den Korallen nur noch ein weißes Kalkskelett.

**Das sensible Ökosystem hat kaum Zeit, sich zu erholen**

Im letzten Jahrzehnt gab es am Great Barrier Reef gleich drei solcher Ereignisse, nämlich 2010, 2015 und 2016. Bei der letzten dieser Bleichen ging laut Experten dort rund ein Drittel der Korallen verloren. Normalerweise brauchen Korallen zehn Jahre, um sich

von solchen „Hitzestress“-Jahren zu erholen.

Was sich vor der Küste von Queensland abspielt, ist leider keine Ausnahme. „Für die Riffsysteme in den Tropen beginnt eine neue Ära, in der die Zeiträume zwischen wiederkehrenden Korallenbleichen zu kurz für eine komplette Erholung sind“, schrieb im Fachjournal „Science“. Die Häufigkeit der Jahre mit Hitzestress hat deutlich zugenommen, vor 40 Jahren lag die Wahrscheinlichkeit ihres Auftretens bei einmal alle 25 bis 30 Jahre, inzwischen sind einmal alle sechs Jahre erreicht.

Ein weiterer Stressfaktor für die Korallen ist die zunehmende Versauerung des Meerwassers. Das hängt ebenfalls mit dem steigenden CO<sub>2</sub>-Gehalt in der Atmosphäre zusammen, was die Kalkbildung für die Schalen und Skelette erschwert.

Knapp ein Drittel des zusätzlichen Kohlendioxids wird von den Meeren aufgenommen, wobei sich Kohlensäure bildet. Der pH-Wert des Wassers ist bereits von 8,25 auf 8,1 gefallen, das heißt, der Säuregehalt hat sich um über ein Viertel erhöht, und er droht bis 2100 auf etwa 7,5 zu sinken, falls keine durchgreifenden globalen Klimaschutzmaßnahmen ergriffen werden. „Die Ozeanversauerung ist der kleine böse Bruder der Klimaerwärmung“, sagt der Ökophysiologe Felix Mark vom Alfred-Wegener-Institut in Bremerhaven.

Fachleute zählen die tropischen Korallenriffe zu den Kippelementen des Klimas. Wird eine bestimmte Temperaturschwelle überschritten, droht ein Absterben eines Großteils dieser wichtigen Ökosysteme. Schon für die inzwischen praktisch unvermeidliche Erwärmung um 1,5 Grad erwartet der Weltklimarat IPCC, dass 70 bis 90 Prozent der Korallen verloren gehen, bei zwei Grad wären es da-

## Leser fragen

### Wie erreichen wir, dass jeder Mensch maximal zwei Tonnen CO<sub>2</sub> pro Jahr erzeugt?

FR-Umweltperte Joachim Wille antwortet:

nach sogar 99 Prozent. Das heißt: Nur noch angepasste Restbestände könnten sich halten.

Die Folgen wären dramatisch. Mit den Riffen geht mehr als ein Touristenparadies verloren. Die Korallenriffe zählen zu den reichsten Ökosystemen der Welt, sie beherbergen bis zu einer Million Tier- und Pflanzenarten, etwa ein Viertel aller Meerestierarten findet hier ihren Lebensraum. Die Riffe konkurrieren in puncto Artenvielfalt sogar mit den mächtigen Regenwäldern der Erde.

#### Die wirtschaftlichen Schäden wären enorm

Doch auch der Mensch profitiert von diesen Ökosystemen. Fische aus den Korallenriffen liefern Nahrung für Millionen Küstenbewohner, zudem bieten die Riffe ihnen Schutz vor Stürmen – besonders wichtig zum Beispiel für die kleinen Inselstaaten im Pazifik. Sie können 70 bis 90 Prozent der Wellenenergie absorbieren und bilden dadurch eine natürliche Schutzbarriere.

Die wirtschaftlichen Schäden, die durch den Verlust von Korallenriffen entstehen, sind beträchtlich – und zwar auf mehreren Ebenen. Die finanziellen Schäden durch Überschwemmungen und Stürme in betroffenen Küstenregionen zum Beispiel verdoppeln bis verdreifachen sich, wenn ein Meter Riff-Höhe verloren geht. Auch der Riff-Tourismus leidet stark, der auf 9,6 Milliarden Dollar Jahresumsatz geschätzt wird und nicht nur für das australische Queensland, sondern auch für viele kleine Entwicklungsländer eine wichtige Einnahmequelle bildet. Ebenso leidet die Fischerei, wenn die Fänge zurückgehen, und negative Folgen drohen auch für die medizinische Forschung, die in den Korallen-Ökosystemen nach neuen Wirkstoffen sucht.

Es lohnt sich also, die Riffe zu schützen. Eine aktuelle Studie der in London ansässigen „Environmental Justice Foundation“ (EJF), die sich für Umweltschutz und Menschenrechte einsetzt, nennt dafür einige Maßnahmen – darunter vor allem die Einhaltung des 1,5-Grad-Limits der Erderwärmung inklusive eines Übergangs auf Netto-Null-Emissionen in den Industrieländern bis 2030 sowie eine Beendigung der illegalen Fischerei in den betroffenen Zonen und der globalen Überfischung. Die Korallenriffe der Welt seien nicht nur eine lebenswichtige Nahrungs- und Einkommensquelle für Millionen Menschen, sondern auch die Heimat einer großen Vielfalt unersetzbarer Lebewesen, sagt EJF-Geschäftsführer Steve Trent. „Wenn wir jetzt nicht handeln, um sie zu schützen, zerstören wir unsere Umwelt und verursachen damit gleichzeitig eine menschliche Tragödie.“

Jeder Deutsche ist pro Jahr für gut 11,5 Tonnen Treibhausgase verantwortlich – im Durchschnitt. Dabei entfallen auf Heizung und Strom 2,4 Tonnen, auf Mobilität 2,2, auf Ernährung 1,7 und auf den sonstigen Konsum 4,6. Tatsächlich schwankt der Wert enorm – zwischen rund fünf und 20 Tonnen oder mehr, je nach Einkommen und Lebensstil. Der Durchschnittswert liegt über dem Weltdurchschnitt von rund sieben Tonnen und auch über dem EU-Mittelwert von 8,5 Tonnen. Als Zielwert werden oft zwei Tonnen pro Kopf und Jahr genannt. Laut Umweltbundesamt muss bis spätestens 2050 sogar weniger als eine Tonne erreicht werden. Das individuelle CO<sub>2</sub>-Sparen geht am besten mit Blick auf die „Big Points“, also auf Maßnahmen und Lebensstil-Veränderungen, die besonders viel Treibhausgase einsparen. Dazu zählen: zu einem Ökostrom-Anbieter wechseln, Fahrrad, Bus und Bahn oder Carsharing statt des eigenen Autos nutzen, Urlaub in Deutschland statt auf anderen Kontinenten machen, mehr Bio-Lebensmittel kaufen, weniger tierische Produkte essen.

Wer ein eigenes Haus hat, verbessert die CO<sub>2</sub>-Bilanz durch gute Wärmedämmung, neue Heizung und solare Heizungsunterstützung. Mieter haben hier wenig Einflussmöglichkeiten, sie können aber durch richtiges Heizen und Lüften CO<sub>2</sub> sparen – und Geld. Auf nur eine Tonne pro Jahr zu kommen, wäre heute selbst für einen anspruchsvollen Eremiten, der in einer Hütte im Wald lebt, unmöglich. Der Grund: Durch die Infrastruktur – Straßen, Krankenhäuser, Schulen, öffentliche Verwaltung – entfallen auf jeden Bundesbürger bereits rund 0,7 Tonnen. Und essen muss der Eremit ja auch. Längerfristig kann aber auch der Posten „CO<sub>2</sub> aus Infrastruktur“ minimiert werden, wenn die gesamte Energieversorgung auf Effizienz und erneuerbare Energien umgestellt ist. Die Bürger haben es selbst in der Hand, dass das schneller geschieht. Nämlich, indem sie sich für die Energiewende engagieren.

Diese Frage stellte Wulfhart Bäumllein, Bad Vilbel

## Klimakippelement Korallen, am Beispiel des Great Barrier Reef



## Die solare Revolution

### Das Potenzial erneuerbarer Energien ist noch lange nicht ausgeschöpft

VON JÖRG STAUDE

Die Sonne schiekt uns keine Rechnung.“ Als der Publizist Franz Alt 1994 sein Buch mit diesem Titel herausbrachte, ahnte er wohl nicht, wie schnell sich erneuerbare Energien in Deutschland und auch weltweit etablieren würden. Es sollte zwar noch bis 2000 dauern, bevor der Boom der Ökoenergien beginnen würde – mit dem Start des Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG). Das „1000-Dächer-Photovoltaik-Programm“ von 1992 bis 1994 war nur ein kleiner Vorläufer gewesen. Die vergangenen 20 Jahre gleichen dagegen einer wahren Revolution im Stromsektor.

Inzwischen wird in Deutschland fast jede zweite Kilowattstunde erneuerbar produziert. Ohne den Einsatz von Sonne, Wind, Wasserkraft und Biomasse lägen die Treibhausgas-Emissionen hierzulande um ein Fünftel höher, die Öko-Energien sparen rund 190 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub> jährlich ein. Und weltweit erreichen die Erneuerbaren inzwischen einen Anteil von einem Drittel an der gesamten Stromproduktion.

Berücksichtigt man allerdings den gesamten Energiebedarf, also auch den für Wärme, Verkehr und Industrie, ist die Entwicklung weit weniger positiv. Hier werden Kohle, Erdöl und Erdgas noch auf Jahre hinaus die wichtigste Quelle bleiben. Weltweit deckten die fossilen Energien 2018 noch rund 85 Prozent des gesamten Energiebedarfs ab. Auf

die Erneuerbaren entfielen knapp elf und auf die Atomkraft etwa vier Prozent. Bei den Erneuerbaren bestreitet die Wasserkraft mehr als die Hälfte. Das heißt: Die Windkraft deckt erst zwei und die Solarenergie erst ein Prozent des Energieverbrauchs der Menschheit ab. Experten erwarten, dass der Anteil regenerativer Energien am weltweiten Gesamtverbrauch bis 2023 auf 12,4 Prozent wächst. Da ist also noch viel Raum nach oben.

#### Wände, die Strom erzeugen

Am stärksten bei den Erneuerbaren legt derzeit die Photovoltaik zu. Sie ist, vor allem im Vergleich zur Bioenergie und zur Wasserkraft, nicht nur am umweltverträglichsten – Solarstrom kann auch praktisch weltweit überall von jedem und jeder erzeugt und eingesetzt werden. Die Spannweite reicht von riesigen, mehrere hundert Megawatt starken Freiflächenanlagen in Wüsten bis hin zu Solarmodulen, die in Regionen Elektrizität verfügbar machen, in denen es kein Stromnetz gibt.

Doch die Visionen gehen noch weiter. So kann die Photovoltaik in alle Lebensbereiche „einsickern“, sie wird dann zu einer „integrierten“ Energieerzeugung. Vorschläge und Projekte dafür gibt es zuhauf: So können E-Autos mit einer solaren Oberfläche ausgestattet werden, was Ladestrom spart und die Reichweite erhöht. Oder: Nicht nur das Hausdach, sondern auch die ganze Gebäudehülle werden mit So-

larmodulen ausgestattet. Untertung von Schienenstrecken oder Autobahnen entstehen Photovoltaik-Wände oder man lässt sie auf Gewässern schwimmen.

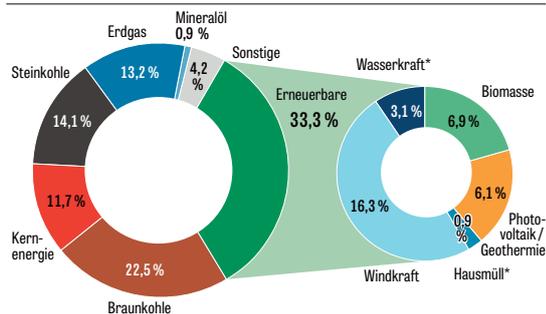
Ergänzt um Stromspeicher und „Wallbox“ zum Laden des E-Autos kann Solarenergie auch die Basis für ein klimaneutrales Wohnen und eine ebensolche Mobilität sein. Wissenschaftler der Polytechnischen Hochschule in Lausanne entwickelten sogar schon ein kühlstrangkroßes Gerät, mit dem im eigenen Haus mit Solarstrom Wasserstoff hergestellt und gespeichert werden kann. Das grüne Gas könnte das Haus an kalten Tagen heizen, außerdem als Treibstoff für Brennstoffzellen-Autos dienen.

In Deutschland liegt das Potenzial der Photovoltaik nach Berechnungen des Freiburger Fraunhofer Instituts für Solare Energiesysteme (ISE) bei kaum vorstellbaren 3400 Gigawatt, also dem 15-Fachen der heutigen Leistung aller hiesigen Kraftwerke. Nötig für eine erfolgreiche Energiewende in Deutschland sind laut ISE aber „nur“ bis zu 500 Gigawatt Photovoltaik-Leistung, zehnmehr als heute in diesem Sektor vorhanden.

Den erneuerbaren Energien gehört die Zukunft – ihre Klima- und Umweltschäden sind viel geringer als die von Kohle, Öl und Gas. Trotzdem muss auch hier auf die Umweltfolgen geachtet werden, siehe die Debatten um die Abstände von Windkraftanlagen oder die „Tank oder Teller“-Problematik bei den Bioenergien.

## Stromerzeugung in Deutschland

Fossile und erneuerbare Energiequellen



vorläufige Angaben, z.T. geschätzt, \* regenerativer Anteil; Stand: Februar 2018

Quelle: Stromerzeugung in Deutschland 2017



Alaska, Quinhagak: Der auftauende Boden zerstört die Lebensgrundlage der Inuits.

MARK RALSTON/AFP

## Gefährliche Tauzeit

Klimamodelle haben unterschätzt, wie schnell das Eis der Permafrostböden verschwindet. Große Mengen an CO<sub>2</sub> und Methan entweichen in die Atmosphäre und heizen die Erde weiter auf

Von Joachim Wille



### DIE SERIE

**Das Klima kann sich abrupt ändern.** Wenn bestimmte Kippunkte überschritten werden – wenn etwa der Amazonas-Regenwald austrocknet oder die Permafrostböden tauen –, kann es zu Kettenreaktionen kommen. Die Erderwärmung könnte sich dann unkontrollierbar verstärken. Doch noch können wir bei den meisten Kippelementen verhindern, dass sie ausgelöst werden. Wie – das stellt die FR in dieser Serie vor. Mehr Informationen zur Serie finden Sie auf: [fr.de/kipppunkte](http://fr.de/kipppunkte)

Die Fundamente von Häusern kippen weg, Straßen sacken ab, auf Friedhöfen fallen Grabsteine um. An Küsten und Ufern müssen ganze Dörfer umgesiedelt werden, weil der Untergrund erodiert. Dort, wo früher Weideland war, entstehen Seen. Bäume und Sträucher wachsen in der Tundra.

Es sind gravierende Veränderungen im hohen Norden des Planeten Erde, wo die Dauerfrostböden auftauen. Dieser Prozess ist ein hohes Risiko für das Weltklima. Die Permafrostböden sind eines der besonders gefährdeten Kippelemente im System Erde.

Auf der Nordhalbkugel ist rund ein Viertel der gesamten Landfläche dauerhaft gefroren – vor allem in Sibirien, Alaska und Nordkanada. Es handelt sich um Relikte aus der letzten Eiszeit, die vor rund 10000 Jahren endete. Der Untergrund besteht dort aus Gestein, Sedimenten oder Erde, gemischt mit bis zu 70 Prozent gefrorenem Wasser.

Teilweise sind die Böden wie im Norden Skandinaviens nur ei-

nige Meter tief vereist, teilweise ist diese Schicht aber auch 1,6 Kilometer dick, so in Teilen Sibiriens. Von Permafrost sprechen die Forscher, wenn die Temperatur im Boden in mindestens zwei aufeinanderfolgenden Jahren unter null Grad liegt.

### Das Gashydrat kann regelrecht explodieren

Direkt nach dem Ende der Eiszeit erwärmten sich auch die gefrorenen Böden, und der Permafrost zog sich nach Norden zurück. Dort und in den Hochgebirgen bestand er dann über die letzten Jahrtausende ohne große Veränderungen. Das änderte sich in den 1990er Jahren, eine Folge des Klimawandels, bei dem die Oberflächen-Temperaturen in der Arktis nun doppelt so stark ansteigen wie im globalen Durchschnitt.

Nach Angaben des Alfred-Wegener-Instituts (AWI) in Potsdam ist die Temperatur in den oberen Schichten des Permafrostes in ei-

nigen Gebieten bereits um etwa zwei Grad Celsius gestiegen. Doch auch in einer Tiefe von mehr als zehn Metern lässt sich die Erwärmung messen – im Schnitt waren es hier 0,3 Grad allein in der Phase der Jahre 2007 bis 2016. Entsprechend schrumpfte die Ausdehnung der Permafrostböden – ihre Grenze hat sich in Russland und Kanada bereits um bis zu 100 Kilometer nach Norden verschoben.

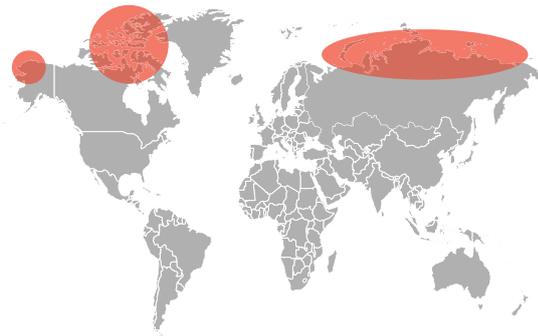
Für das Klima birgt der gefrorene Boden zwei große Gefahren, die durch das Tauen aktiviert werden. Einmal geht es um die dort seit der Eiszeit konservierten riesigen Mengen an Biomasse abgestorbener Pflanzen. Sie werden bei Erwärmung von den dann aktivierten Bodenbakterien zersetzt, dabei entstehen die Treibhausgase CO<sub>2</sub> und Methan. Zudem kann das in manchen Regionen im Untergrund gespeicherte Gashydrat – ein gefrorenes Gemisch aus Wasser und Methan – bei Erwärmung regelrecht explodieren.

Das Potenzial für eine zusätzliche Erhöhung des Treibhauseff-

ektes in der Atmosphäre ist groß. Denn im Permafrost sind rund 1,5 Billionen Tonnen Kohlenstoff gespeichert – etwa doppelt so viel wie sich in der Atmosphäre befindet. Rund 70 Prozent davon lagern in den oberen drei Metern, also in Schichten, die besonders vom Auftauen gefährdet sind. Aber auch in Tiefen von bis zu 40 Metern befinden sich vermutlich beträchtliche Mengen, die klimarelevant werden könnten.

Jüngste Forschungen zeigen, dass Wissenschaftler das Tempo des Auftauens in ihren Modellen unterschätzt haben. So stellte eine Wissenschaftlergruppe um den Geologen Vladimir Romanovsky von der Universität Fairbanks in Alaska 2019 fest, dass Dauerfrostböden in vielen arktischen Regionen Kanadas bereits viel stärker betroffen sind als erwartet. Laut ihrer Studie ist dieser Prozess bereits so weit vorgeschritten, wie es in den aktuellen Modellierungsszenarien des Weltklimarats IPCC erst für das Jahr 2090 erwartet wurde. Es

Klimakippelement Permafrostboden



Leser fragen

Woher soll die zusätzliche Energie für die E-Mobilität kommen?

FR-Umweltexperte Joachim Wille antwortet:

Ein Batterie-Pkw mit 15 000 Kilometern Jahresfahrleistung verbraucht im Jahr im Schnitt rund 3000 Kilowattstunden – in etwa so viel wie ein Zwei-Personen-Haushalt. Würden alle 48 Millionen Pkw in Deutschland auf einen Schlag elektrifiziert, bräuchte man dafür rund 145 Terawattstunden (TWh). Das heißt: Die Stromproduktion – 2019 waren es 607 TWh – müsste um rund ein Viertel ansteigen. Die Bundesregierung peilt für 2030 eine E-Flotte von zehn Millionen Pkw an, dafür bräuchte man rund 30 TWh, also fünf Prozent mehr als heute. Freilich ist der Umstieg auf E-Autos erst dann wirklich sinnvoll, wenn Ökostrom sie antreibt. Und daran mangelt's. Um die gesamte Flotte zu elektrifizieren, bräuchte man rund 30 Millionen kleine Solaranlagen auf Hausdächern oder 24 000 Windkraftanlagen an Land oder 6000 Offshore-Windräder respektive eine Kombination davon. Das wäre ein Projekt für zwei oder drei Jahrzehnte. Problem: Der Ausbau der Windkraft ist zuletzt nahezu zum Erliegen gekommen, und das Ziel der Bundesregierung, den Ökostromanteil bis 2030 von derzeit rund 45 auf 65 Prozent hochzuschrauben, ist ohne neue Maßnahmen illusorisch. Für die Windkraft, aber auch für die Photovoltaik und Stromspeicher-Lösungen braucht es einen neuen Anlauf. Eine Alternative, um den Verkehr CO<sub>2</sub>-neutral zu machen, sind synthetische Kraftstoffe oder Gase, die mit billigem Ökostrom in Ländern mit großem Solar-, Wind- oder Wasserkraftpotenzial hergestellt werden – also zum Beispiel in Nordafrika, dem Nahen Osten oder Skandinavien. Bisher ist das noch Zukunftsmusik, doch eine Reihe von Unternehmen arbeitet daran, die entsprechenden „Power-to-X“-Technologien marktreif zu machen. Vorteil wäre hier, dass auch Verbrennungsmotoren klimafreundlicher betrieben werden könnten. Hauptprobleme sind noch die hohen Kosten, die um einen Faktor 5 schlechtere Gesamteffizienz im Vergleich zum E-Auto und neue Abhängigkeiten von Energielieferanten aus dem Ausland – wie heute beim Erdöl. Die Herstellung des Ökosprits dürfte bei Markteinführung zwei Euro pro Liter kosten, bei Benzin und Diesel sind es derzeit 30 bis 40 Cent.

könne sein, dass der Kippunkt, ab dem das Auftauen kaum mehr gestoppt werden kann, bereits überschritten sei, meinten die Experten. Der führende deutsche Permafrost-Forscher, AWI-Sektionsleiter Professor Guido Grosse, kommentiert: „Das übertrifft alles, was wir aufgrund unserer Klimamodelle erwartet hatten.“

In manchen Regionen ändert sich die Lage abrupt

Grosse erforscht die Permafrost-Regionen seit 20 Jahren, er versteht auf ein weiteres Phänomen: Die gefrorenen Böden tauen in vielen Regionen nicht kontinuierlich auf, sondern abrupt – dort, wo der Untergrund mit viel Eis durchsetzt ist. Der Untergrund sinkt ab, wenn das Eis schmilzt, und es bilden sich so genannte Thermokarst-Seen, unter denen es schnell weiter taut. „Das Tauen unter den Seen passiert innerhalb weniger Jahrzehnte und kann sehr schnell tiefe Schichten erreichen“, erläutert der Experte. Es könne unter bestimmten Bedingungen – etwa bei einer starken Erwärmung oder veränderten Niederschlägen – regional auch sehr plötzlich stattfinden.

Aktuelle Schätzungen gehen davon aus, dass abruptes Auftauen rund ein Fünftel der Permafrostböden gefährdet – und zwar ausgerechnet dort, wo am meisten Kohlenstoff in der Erde lagert. Laut einer neuen Studie, an der der Potsdamer Experte beteiligt war, könnte die Menge an klimawirksamen Gasen, die durch das Permafrost-Tauen in die Atmosphäre gelangen, 40 Prozent höher sein als bisher angenommen.

Eine Analyse von Grosse und anderen Forschern zeigte, dass bis 2100 rund 15 Prozent des leicht abbaubaren Kohlenstoffs aus dem Permafrost in Form von CO<sub>2</sub> oder Methan in die Atmosphäre gelangen dürften, wenn sich die Erde im bisherigen Tempo weiter erwärmt. Allein das würde die globale Durchschnittstemperatur bis 2100 um bis zu 0,27 Grad ansteigen lassen, die sich seit der Industrialisierung bereits um 1,1 Grad erhöht hat. Kämen die 0,27 Grad hinzu, wäre das in Paris vereinbarte „Sicherheitslimit“ von 1,5 Grad maximaler Erwärmung schon dadurch fast erreicht.

Die Frage stellte: Klaus Philipp Mertens, Frankfurt

Bitte umsteigen

Es gibt viele Ideen zur Lösung des Verkehrsproblems – nur werden sie bisher kaum umgesetzt

VON FRIEDERIKE MEIER

Tempolimit, nein danke“ – unter diesem Motto sammelt die CSU Unterschriften gegen ein generelles Tempolimit auf Autobahnen. Abgesehen davon, dass eine Geschwindigkeitsbegrenzung nur eine von vielen Maßnahmen sein kann, den Verkehr klimafreundlicher zu machen, zeigt die hoch emotionale Debatte, warum Klimaschutz in diesem Bereich so schwierig ist: Um den Verkehr klimaschonender zu machen, müssen fast alle ihre Gewohnheiten ändern. Und das ruft Widerstände hervor. Zudem gibt es – anders als bei der Umstellung auf erneuerbare Energien beim Strom – nicht die eine offensichtliche Lösung.

Doch Klimaschutz im Verkehr ist nötig: Zwischen 1970 und 2015 hat sich der Treibhausgasausstoß weltweit in diesem Sektor mehr als verdoppelt, und mehr als 80 Prozent dieser Zunahme verursachte der Straßenverkehr. Inzwischen gibt es mehr als eine Milliarde Autos auf der Erde.

Wenn sich nicht grundlegend etwas ändert, könnte der Verkehrsbereich Klimaschutz-Bemühungen in anderen Sektoren – etwa bei den Kraftwerken oder in der Industrie – zunichte machen: Der OECD-Denkfabrik „International Transport Forum“ geht davon aus, dass sich der Personenverkehr global bis zum Jahr 2050 verdreifachen wird, genauso wie der Frachtverkehr. Selbst mit derzeitigen und erwarteten Klimaschutz-Maßnahmen prognostiziert er in einer Studie einen Anstieg der CO<sub>2</sub>-Emissionen im Verkehr um 60 Prozent.

In Deutschland dreht sich die Diskussion um die Verkehrswende heute vor allem darum, was den Verbrennungsmotor der Autos ersetzen soll. Der Sachverständigenrat für Umweltfragen (SRU) empfiehlt in einer Studie, Otto- und Dieselmotoren wo immer möglich durch Elektroantriebe zu ersetzen. Denn unter anderem haben Elektromotoren einen relativ hohen Wirkungsgrad. Synthetische Kraftstoffe, die mit erneuerbaren Energien hergestellt werden, oder Biokraftstoffe sollen nur dort verwendet werden, wo eine Elektrifizierung nicht möglich ist, zum Beispiel im Luft- und Seeverkehr. Außerdem müssten alle Fahrzeuge effizienter werden.

Mobil, aber anders

Allerdings reicht es nicht, einfach alle Autos, die heute auf der Straße sind, durch Elektroautos zu ersetzen. Verkehrswissenschaftler sind sich einig, dass es weniger Fahrzeuge geben muss. Eine Hoffnung für den Verkehr in den Städten liegt im Carsharing. Aber nicht nur Autos können geteilt werden, auch Fahrräder, Roller und Tretroller, wie verschiedene Leihsysteme zeigen. Außerdem müssen natürlich der öffentliche Nahverkehr und die Radwege ausgebaut werden. Der Klimanutzen des autonomen Fahrens, an dem Auto- und Digitalkonzerne arbeiten, ist hingegen umstritten

– selbstfahrende Autos könnten auch zu mehr Verkehr führen.

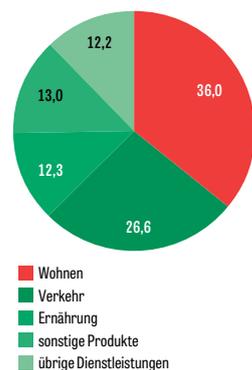
Aber selbst wenn es weniger Autos gibt und die Menschen zu Bus und Bahn oder aufs Fahrrad wechseln – um die Klimaschutzziele zu schaffen, reicht das nicht. Nach Ansicht von Wissenschaftlern müssen auch die zurückgelegten Strecken kürzer werden. Das Umweltbundesamt hat die „Stadt der kurzen Wege“ in einer Studie beschrieben. Hier soll eine Person im Schnitt nur noch 28 Kilometer pro Tag zurücklegen – das ist etwa ein Viertel weniger als heute. Möglich werden soll das durch Nachverdichtung – also Bebauung von Brachflächen und Baulücken. Öffentlicher Verkehr und Radschnellwege sollen die Zentren des Umlands mit den Städten verbinden.

Für die Verkehrswende auf dem Land schlagen Experten ein Schnellbus-System vor, das die Städte verbindet, Zubringerbusse sollen Dörfer anbinden. Entlastung kann auch das private Carsharing bringen, wie es derzeit in Projekten wie „Carla“ im thüringischen Wartburgkreis getestet wird. Auch der Ausbau von Radwegen an den häufig gefährlichen Landstraßen wird empfohlen.

Die Herausforderungen der Verkehrswende sind groß, doch der Umbau hilft nicht nur dem Klima, er bringt auch mehr Lebensqualität: Fahrradfahren ist gesund, Bahnfahren entspannt (meistens), und mit weniger Autos bleibt mehr Platz für Menschen, während die Schadstoff- und Lärmbelastung sinkt.

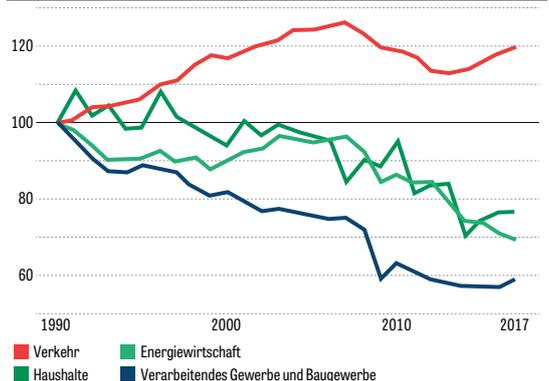
Private Haushalte

Ausstoß CO<sub>2</sub>-Emissionen, in Prozent



CO<sub>2</sub>-Emissionen

Nach ausgewählten Sektoren in der Europäischen Union, Index 1990=100





So wie diese nordkanadische Landschaft könnten große Teile Europas vereisen, wenn der Golfstrom mit seiner klimamildernden Wirkung versiegen würde.

DPA

## Gefahr für

# Europas Zentralheizung

Das abflauende Golfstrom-System ist eines der Kippelemente des Klimas / Von Joachim Wille



### DIE SERIE

**Das Klima kann sich** abrupt ändern. Wenn bestimmte Kippunkte überschritten werden – wenn etwa der Amazonas-Regenwald austrocknet oder die Permafrostböden tauen –, kann es zu Kettenreaktionen kommen. Die Erderwärmung könnte sich dann unkontrollierbar verstärken. Doch noch können wir bei den meisten Kippelementen verhindern, dass sie ausgelöst werden. Wie – das stellt die FR in dieser Serie vor. Mehr Informationen zur Serie finden Sie auf: [fr.de/kippunkte](http://fr.de/kippunkte)

**E**in Europa ohne Golfstrom? Das heißt: Ganz Skandinavien liegt unter einer Eisdecke, und in Hamburg oder Berlin herrscht sibirisches Klima. Die polare Kaltluft fällt erbarmungslos über Europa herein, denn es gibt kein temperiertes Nordmeer-Wasser, das die arktischen Winde erwärmt, bevor sie das Festland erreichen. Das Szenario verdeutlicht: Die natürliche „Wärmepumpe“ – der Golfstrom und seine Verlängerung Richtung Europa, der Nordatlantikstrom – ist ein Lebenselixier für Nord- und Mitteleuropa.

Die Strömung fördert gigantische Mengen des warmen Wassers aus dem Golf von Mexiko nach Nordosten quer über den Atlantik, vorbei an den Küsten Großbritanniens und Irlands bis hinauf nach Nordnorwegen. Vor Grönland sinkt das Wasser dann in die Tiefe ab und strömt abgekühlt wieder nach Süden. Ohne diese Umwälzanlage hätten Nord- und Mitteleuropa ein mit Alaska vergleichbares Klima. Seit seinem abrupten Entstehen vor rund 15000 Jahren, am Ende

der letzten Eiszeit, war das System innerhalb gewisser Grenzen stabil. Doch inzwischen ist klar: Die Pumpe läuft bereits deutlich schwächer. Golf- und Nordatlantikstrom sind Teil eines weit verzweigten Strömungssystems in den Weltmeeren. Das Golfstrom-System transportiert bis zu 150 Millionen Kubikmeter Wasser pro Sekunde: 100 Mal so viel, wie über alle Flüsse der Erde zusammen in die Meere fließt.

### Leistung vergleichbar mit einer Million Atomreaktoren

Die Wärme, die die Strömung mit sich führt, entspricht der Leistung von rund einer Million Atomreaktoren. Dieser Vergleich macht deutlich, wieso ein mögliches Versiegen der Zirkulation große Auswirkungen auf die Nordhalbkugel hätte – und warum Klimaforscher den Golfstrom als eines der Kippelemente im Erdsystem bezeichnen. Der Name Golfstrom wurde vom amerikanischen Allroundge-

nie und Staatsmann Benjamin Franklin geprägt. Franklin ließ 1770 als Erster eine Karte der Meeresströmungen im Atlantik anfertigen. Als Entdecker des Golfstroms gilt aber der spanische Seefahrer Juan Ponce de León. Auf seiner Expedition im Jahr 1503 ins heutige Florida fiel seinem Navigator Antón de Alaminos eine gewaltige Meeresströmung auf, die in Küstennähe seinen Schiffen den Weg nach Süden erschwerte. Schon kurze Zeit darauf machte Alaminos sich die Strömung zunutze, indem er für den Rückweg nach Spanien einen Kurs auswählte, mit dem die Strecke in der „kurzen Zeit“ von nur zwei Monaten zu schaffen war.

Heutzutage werden der Golfstrom und andere thermohaline Strömungen in den Weltmeeren wissenschaftlich exakt vermessen – im 2000 gestarteten internationalen ARGO-Programm, das weltweit fast 4000 automatisierte Treibbojen einsetzt, davon ein großer Teil im Atlantik zwischen Grönland, Skandinavien und

Nordamerika, Afrika und Südamerika. Sie übertragen von dort Wassertemperatur, Salzgehalt und Strömung, die in bis zu 2000 Metern Tiefe erhoben werden. Im britisch-amerikanischen Messprojekt RAPID mit 226 am Meeresboden verankerten Instrumenten wird zudem seit 2004 die Gesamtströmung am besonders geeigneten Breitengrad (26,5° Nord) ermittelt. Um längerfristige Veränderungen erkennen zu können, nutzen Forscher Datensätze zu Meerestemperaturen im Atlantik, die es seit dem 19. Jahrhundert gibt, zudem Analysen von Bohrkernen aus Sedimenten am Meeresgrund, die Aufschlüsse über die Strömungsverhältnisse in den vergangenen 1600 Jahren geben.

Klimamodelle sagen seit langem voraus, dass die Folgen der erhöhten Temperaturen die Stabilität des Golfstrom-Nordatlantikstrom-Systems gefährden könnten – bis hin zu einem völligen Stillstand. Befürchtet wird, dass die Erwärmung der Meere, ein wachsender Einstrom von Schmelzwasser aus

**Klimakippelement Golfstrom-System**

**Leser fragen**

**Wie werden Menschen trotz des Verlusts fruchtbarer Böden ernährt?**

FR-Umweltexperte **Joachim Wille** antwortet:

Die Weltbevölkerung wird nach Prognosen der Vereinten Nationen von derzeit 7,6 Milliarden Menschen bis Mitte des Jahrhunderts auf knapp zehn Milliarden ansteigen, also um rund ein Drittel. Das zeigt, dass es großer Anstrengungen bedarf, um die Ernährung sicherzustellen, und das möglichst klimafreundlich. Erschwert wird die Lage dadurch, dass Agrarböden zunehmend gefährdet sind – etwa durch Überbauung für Straßen und Siedlungen, Ausbreitung von Wüsten, Erosion, Überweidung und Auslaugung und Klimaveränderungen. Jedes Jahr gehen weltweit mehr als 24 Milliarden Tonnen wertvoller Bodenkrume verloren. Global hungern mehr als 800 Millionen Menschen, allein in Afrika rund 200 Millionen, dort sind 70 Prozent der Böden mehr oder weniger stark degradiert. Ausichtslos ist die Lage nicht. Tatsächlich fahren Landwirte aktuell nicht nur in absoluten Zahlen die historisch größte Ernte ein, sondern auch pro Kopf der Weltbevölkerung. Möglichst effektiv als Lebensmittel eingesetzt könnte diese Ernte laut Welternährungsorganisation FAO sogar zwölf bis 14 Milliarden Menschen ernähren. Mehr Klimaschutz und ein schonender Umgang mit den Böden sind auch möglich. Allerdings müssten dazu vor allem die Verluste an Lebensmitteln eingedämmt werden, die weltweit rund ein Drittel der Produktion ausmachen. Ein Schalthebel ist auch, den Konsum von Fleisch- und Milchprodukten zu reduzieren. Bereits 35 Prozent der weltweiten Getreide- und 70 Prozent der Sojaernte werden für die Tierfütterung eingesetzt: Bei der Umwandlung der Pflanzen in Tierprodukte geht viel Energie verloren. Für den Soja-Anbau wird zudem oft Regenwald vernichtet. Forscher der Uni Oxford zeigten, dass eine stärker pflanzenbasierte Ernährung das Potenzial hat, Treibhausgas-Emissionen bis 2050 um 30 bis 70 Prozent zu reduzieren. Das heißt, auch der Einzelne ist gefragt: Durch klimabewusste Ernährung und den Griff zu möglichst wenig industriell verarbeiteten Lebensmitteln. Diese werden mit hohem Energieaufwand hergestellt. Beispiel: Tiefkühl-Pommes sind 28 Mal so klimaschädlich wie die entsprechende Menge Salzkartoffeln.

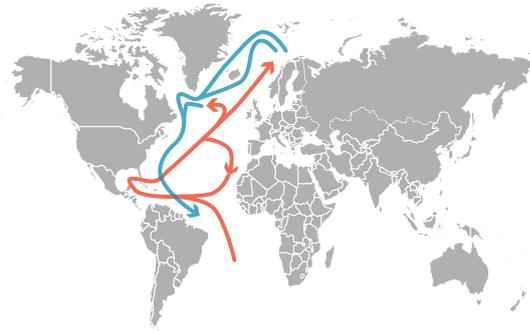
Diese Frage stellte **Wolfgang Fladung** aus Bad Camberg

Grönland und mehr Niederschläge das Absinken des Warmwassers im Nordatlantik und damit seine Rückkehr Richtung Golf von Mexiko bremsen. Hauptgrund: Der relativ hohe Salzgehalt des Wassers, der das Absinken mit bewirkt, würde durch die stärkere Süßwasser-Zugabe sinken. Tatsächlich haben mehrere internationale Forscherteams nachgewiesen, dass sich die Umwälzströmung im Atlantik bereits abgeschwächt hat und heute geringer ist als jemals in den vergangenen 1000 Jahren. Experten um Professor Stefan Rahmstorf vom Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung zeigten etwa 2018 in einer Untersuchung, dass sie seit 1950 um 15 Prozent abgenommen hat. „In absoluten Zahlen bedeutet das eine Abschwächung der Strömung um drei Millionen Kubikmeter pro Stunde – eine Menge, die dem Dreifachen des Abflusses aller Flüsse der Erde zusammen entspricht“, erläutert Rahmstorf, einer der weltweit führenden Forscher zu dem Thema.

**Niemand weiß, ob es zum Komplett-Ausfall kommt**

Laut einer Studie britischer Klimaexperten, die die Umwälzströmung in den vergangenen 1500 Jahren rekonstruierten, begann die anomale Abschwächung des Nordatlantik-Stroms bereits um 1850 und hat sich seither verstärkt. Die Forscher taxieren das Minus auf 15 bis 20 Prozent. Die Trends entsprechen „exakt dem, was Computersimulationen für eine Verlangsamung des Strömungssystems vorhersagen“, sagt Rahmstorf. Eine weitere Abschwächung hält er für wahrscheinlich, wenn die globale Erwärmung nicht zwischen 1,5 und zwei Grad begrenzt wird, wie im Pariser Klimavertrag gefordert. Ob es zum befürchteten Komplett-Ausfall des Golfstroms kommen könnte, ist noch unklar.

Allerdings: Auch ein abgeschwächtes Golfstrom-System kann einschneidende Folgen haben. Hält der Trend an, könnte er die Wettermuster Europas fundamental verändern, warnen Experten. Die veränderte Temperaturverteilung im Meer beeinflusst die Luftströmungen und führt so dazu, dass etwa Tiefdruckgebiete und Stürme auf anderen Bahnen ziehen. So könnte unter anderem das Sturmrisiko in Europa steigen. Auch paradoxe Folgen sind denkbar: Ein kälterer, weniger vom Golf- und Nordatlantikstrom erwärmter Atlantik kann Hitzewellen in Europa auslösen, weil dadurch der Einstrom von Warmluft aus dem Süden begünstigt wird.



**Was tun in der Landwirtschaft?**

Es ist eine riesige Herausforderung, die wachsende Weltbevölkerung zu ernähren – und dabei auch noch das Klima zu schützen

VON FRIEDERIKE MEIER

**T**rockenheit, Ernteausfälle, finanzielle Verluste: Die Landwirtschaft leidet auch in Deutschland schon unter dem Klimawandel – nach dem Hitzesommer 2018 bekamen die Landwirte Entschädigungen in dreistelliger Millionenhöhe von der Bundesregierung. Allerdings ist die Landwirtschaft nicht nur Opfer der Klimakrise. Global gesehen verursacht die Herstellung von Lebensmitteln inklusive der dafür nötigen Landnutzung, der Verarbeitung und des Transports rund ein Viertel der Treibhausgasemissionen. Am stärksten tragen dazu die Tierhaltung und der Anbau von Nahrungsmittelpflanzen bei.

In Deutschland ist die Landwirtschaft zwar nur für rund acht Prozent des Klimagasausstoßes verantwortlich, allerdings sind die Emissionen in diesem Sektor seit dem Basisjahr 1990 vergleichsweise wenig gesunken. Sie liegen heute rund 20 Prozent niedriger, während das gemeinsame Ziel für alle Bereiche bis 2020 minus 40 Prozent beträgt, und seit dem Jahr 2000 gab es kaum noch Fortschritte. Nur der Verkehrssektor schneidet noch schlechter ab. Um das 2030-Ziel für den Agrarsektor zu erreichen – laut dem Plan der Bundesregierung minus 31 bis 34 Prozent gegenüber 1990 –, muss noch viel geschehen.

Am stärksten schlagen in der Landwirtschaft die Treibhausgase Methan und Lachgas zu Buche,

die 25- respektive 300-mal klimaschädlicher sind als Kohlendioxid. Methan entsteht in Rindermägen sowie bei der Lagerung von Mist und Gülle. Landwirtschaftlich genutzte Böden setzen ebenfalls Treibhausgase frei, etwa wenn Grünland oder Moore in Acker umgewandelt werden. Vor allem durch die Düngung mit mineralischem Stickstoff und Gülle wird zudem Lachgas freigesetzt. In der Landwirtschaft gibt es nicht die eine Lösung, mit der das Klima gerettet werden kann: Die Herausforderung, eine wachsende Weltbevölkerung zu ernähren, ist riesig – zumal die Erträge durch den Klimawandel sinken.

**Hilft mehr Bioanbau?**

In Deutschland setzt das Landwirtschaftsministerium unter anderem auf die verschärften Vorgaben der Düngeverordnung von 2017 und die Vergärung von Gülle in Biogasanlagen. Das führt zu sinkenden Emissionen, weil sich in den Böden durch verringerte Düngung weniger Lachgas bildet. Dank der Nutzung von mehr Gülle zur Biogasproduktion würde auch weniger Methan freigesetzt.

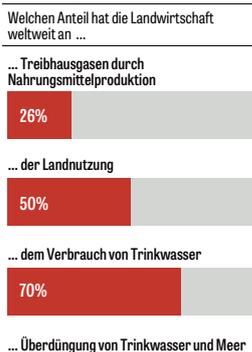
Allerdings bemängeln Kritiker, dass Maßnahmen wie diese auf Dauer nicht ausreichen werden. Viele Umweltschützer fordern eine möglichst schnelle und weitreichende Umstellung auf Ökolandwirtschaft. Die Bundesregierung hat sich zum Ziel gesetzt, dass im Jahr 2030 ein Fünftel der Anbaufläche in Deutschland biologisch bewirtschaftet werden soll. Heute sind es knapp zehn Prozent.

Doch hilft das dem Klima? Experten des staatlichen Thünen-Instituts in Braunschweig haben Ökolandbau mit konventioneller Landwirtschaft verglichen. Das Ergebnis: Flächen im Ökolandbau speichern in der Tat mehr Kohlenstoff und emittieren geringere Mengen an Treibhausgasen als konventionell bewirtschaftete. Hinzu kommen Vorteile für die Biodiversität und den Schutz des Grundwassers. Allerdings schneidet der Bioanbau pro Kilo Lebensmittel betrachtet ähnlich ab wie die konventionelle Landwirtschaft. Der Grund: Er bringt pro Fläche geringere Erträge.

Zu einem frappanten Ergebnis kamen Agarexperten der britischen Universität Cranfield bei London. Sie haben ausgerechnet, dass die Erträge in England und Wales um 40 Prozent zurückgingen, wenn die Landwirtschaft dort komplett auf bio umgestellt würde. Dadurch müssten Lebensmittel von anderswo importiert werden, und die Emissionen würden insgesamt sogar steigen.

Die Wissenschaftler schließen daraus: Ein Komplettumstieg ist nur klimafreundlich, wenn gleichzeitig die Erträge im Ökolandbau steigen und die Menschen ihre Ernährung ändern – vor allem mit weniger Fleisch und Milchprodukten.

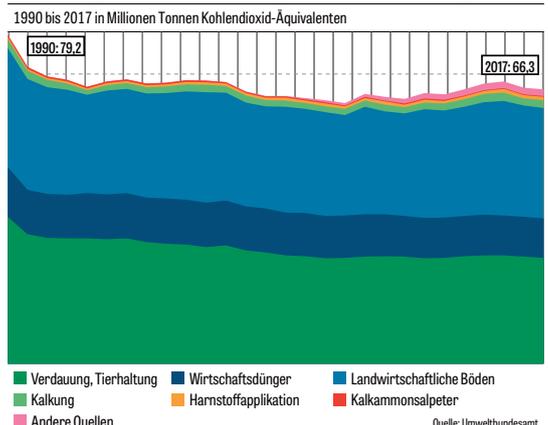
**Schwergewicht**



Stand 2018

Quelle: WorldData.org

**Treibhausgas-Emissionen der Landwirtschaft nach Kategorien**





Vereinzelt leuchtet es schon heute grün in der Sahara. Forscher glauben, dass bis zum Ende des Jahrhunderts noch viele weitere Pflanzen im Süden der Wüste wachsen werden. AFP

## Die Sahara ergrünt – zumindest ein bisschen

Wissenschaftler gehen davon aus, dass der menschengemachte Klimawandel die Wüste zurückdrängt – wenn auch nur für eine gewisse Zeit / Von Joachim Wille



### DIE SERIE

**Das Klima kann sich abrupt ändern.** Wenn bestimmte Kippunkte überschritten werden – wenn etwa der Amazonas-Regenwald austrocknet oder die Permafrostböden tauen –, kann es zu Kettenreaktionen kommen. Die Erderwärmung könnte sich dann unkontrollierbar verstärken. Doch noch können wir bei den meisten Kippelementen verhindern, dass sie ausgelöst werden. Wie – das stellt die FR in dieser Serie vor. Mehr Informationen zur Serie finden Sie auf: [fr.de/kipppunkte](http://fr.de/kipppunkte)

Die Sahara ist die größte Wüste der Welt. Sie reicht von der afrikanischen Atlantikküste bis zum Roten Meer, umfasst neun Millionen Quadratkilometer und damit mehr als 25 Mal so viel Fläche wie Deutschland. Die Sandwüste, die die meisten mit dem Stichwort verbinden, macht zwar nur rund 20 Prozent der Sahara aus; ansonsten besteht sie aus Fels- und Geröllwüste. Gemeinsam ist allen Ausprägungen aber eines: Für Menschen, Tiere und Pflanzen ist es eine extreme Umgebung, in der das Überleben hohe Anpassung erfordert. Doch es gab in der Erdgeschichte auch schon Phasen mit einer grünen Sahara. Und es ist nicht ausgeschlossen, dass die Wüste als Folge der menschengemachten Erderwärmung wieder zurückgedrängt wird – zumindest zeitweise.

Wissenschaftler stellen sich seit den 1990er Jahren die Frage, welchen Einfluss der Klimawandel auf die heutige Wüste haben

wird. Die Folie, vor der das geschieht, ist eine Sahara, wie sie zuletzt im frühen und mittleren Holozän existierte – vor etwa 11 000 bis 5000 Jahren. Es gab dort zwar keinen Regenwald wie in den Tropen, aber eine grüne Savanne mit vielen Flüssen und Seen, an deren Rand üppige Galeriewälder wuchsen.

#### Wo es heute trocken ist, werden Pflanzen wachsen

Solche Perioden mit viel Vegetation in der Sahara hat es mindestens in den vergangenen 500 000 Jahren immer wieder gegeben, ausgelöst durch eine Änderung der Erdbahn um die Sonne – im Gegensatz zum heutigen Klimawandel ein ganz allmählicher Prozess.

Vor rund 5500 Jahren dehnte sich die Sahara auf ihre heutige Größe aus. Seit etwa 1920 ist sie laut einer US-Studie aus dem Jahr 2018 um rund zehn Prozent ge-

wachsen. Als Ursache dafür identifizierten die Wissenschaftler von der University of Maryland vorrangig natürliche Klimaveränderungen; ein Drittel sei jedoch höchstwahrscheinlich durch den menschengemachten Klimawandel bedingt. Dieser lasse die Sahara vor allem an ihrem Nordrand wachsen. Das entspräche auch der festgestellten Verschiebung der Klimazonen in Richtung der Pole, die einer der Gründe für die zunehmende Trockenheit im Mittelmeerraum ist.

Doch es gibt auch einen anderen Trend – und der betrifft vor allem den Süden der Sahara und die sich daran anschließende Sahelzone. Die Frage, ob das Treibhaus die Sahara ergrünen lassen wird, wird heute mit einem eingeschränkten Ja beantwortet. Aus den kargen Ausläufern der Sahara, wo Viehhirten und Bauern traditionell mit der Trockenheit kämpfen, könnten bereits in den kommenden Jahrzehnten grüne Regionen werden –

wenn der menschengemachte Klimawandel weiter so voranschreitet wie bisher. Zumindest sagt das eine Reihe der Klimamodelle voraus, in denen mit einem anhaltenden CO<sub>2</sub>-Anstieg in der Atmosphäre – also ohne wirksamen Klimaschutz – kalkuliert wurde.

„Bis zum Ende des 21. Jahrhunderts wird es nach den Berechnungen im zentralen und westlichen Sahel sowie am Südrand der Sahara tatsächlich deutlich grüner werden“, sagt der Direktor am Max-Planck-Institut für Meteorologie (MPI-M), Martin Claussen. Nicht die ganze Wüste werde wieder zur Savanne, aber im Süden der Region entwickle sich ein breiter „Grüngürtel“.

Hauptgrund für das erwartete Ergrünen ist der Düngeeffekt, den die steigende CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Luft auf die Vegetation hat. Pflanzen benötigen für die Photosynthese CO<sub>2</sub>: Sie „atmen“ das Gas ein und wandeln es mithilfe von Sonnenlicht in Baustoffe für

**Leser fragen**

**Hilft ein Ende der Wegwerfgesellschaft, das Energieproblem zu entschärfen?**

FR-Umweltexperte Joachim Wille antwortet:

ihre Zellen um. Ist mehr CO<sub>2</sub> verfügbar, wachsen die Pflanzen besser – vorausgesetzt, es gibt genügend Niederschläge.

Wie letztere sich entwickeln, ist noch nicht ganz klar. Die Klimamodelle sagen für den Sahel im Schnitt nur einen leichten Trend zu mehr Niederschlägen in einem wärmeren Klima voraus, wie Forscher des Potsdam-Instituts für Klimafolgenforschung 2017 herausfanden. Doch es könnte in der Region deutlich feuchter werden – durch eine Verlagerung des westafrikanischen Sommermonsuns nach Norden. Immerhin sieben der betrachteten 30 Modelle prognostizieren für 2100 rund 40 bis 300 Prozent mehr Regen als heute.

**Die Übergangszeit könnte Probleme mit sich bringen**

Diese Modelle deuten auf einen möglichen Kippunkt im Klimasystem hin: Erreicht der Anstieg der Temperaturen der Meeresoberflächen im Mittelmeer und im tropischen Atlantik einen bestimmten Schwellenwert, verändert sich hier das Klima grundlegend. Träte dies ein, wäre die südliche Sahara ein Kippelement. Die Vegetation nähme deutlich zu, und für die Landwirtschaft gäbe es bessere Bedingungen. Allerdings könnte die Übergangszeit vom einen in das andere Klima große Probleme mit sich bringen – zum Beispiel Schwankungen zwischen Dürren und Überflutungen. Zwischen dem Sudan und Mauretanien könnte das mehr als 100 Millionen Menschen treffen; in einer Region, die heute schon instabil ist, bedingt durch Terrorismus und Kriege.

Ob Sahara und Sahel tatsächlich ein Kippelement sind, wird in der Wissenschaft allerdings noch diskutiert. Auch Claußen schließt nicht aus, dass ein veränderter Sommermonsun zum Ergrünen des Sahel und der Süd-Sahara einen Teil beitragen könnte. Auf Satellitenbildern sei eine stärkere Vegetation bereits heute erkennbar. Doch er leitet aus den Ergebnissen der am MPI-M benutzten Klimamodelle ab, dass der Grüngürtel bei weiterer globaler Erwärmung wahrscheinlich nur relativ kurz bestehen wird: „Wenn nach einem kräftigen Anstieg in diesem Jahrhundert die CO<sub>2</sub>-Emissionen im übernächsten Jahrhundert wieder deutlich sinken – und das würden sie unweigerlich tun, wenn die fossilen Kohlevorräte erschöpft oder nur noch sehr schwer zugänglich sind –, dann gewinnen Hitze und Wassermangel die Oberhand, und die Vegetation geht wieder zurück.“

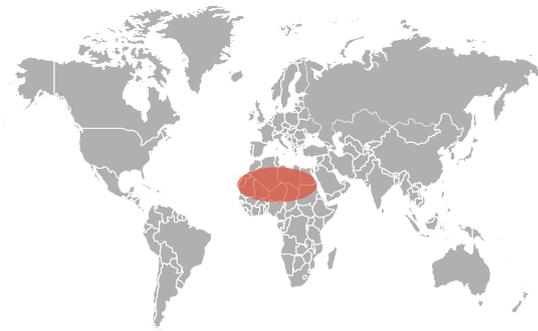
Zudem warnt er davor, die Aussicht auf bessere Lebensbedingungen für die Sahel-Bewohner als Argument gegen aktiven Klimaschutz zu nutzen. „Nach bisherigen Untersuchungen dominieren die negativen Folgen des Klimawandels.“

Der „Coffee to Go“-Becher ist das Symbol der Wegwerfgesellschaft. Für die pro Jahr in Deutschland benutzten 2,8 Milliarden Becher sind, so die Deutsche Umwelthilfe, rund 320 Millionen Kilowattstunden Energie nötig. Damit könnten 100 000 Durchschnittshaushalte ein Jahr lang mit Strom versorgt werden. Der Ersatz von Einweg- durch Mehrwegbecher ist also aktiver Klimaschutz – obwohl man auch den Energieaufwand gegenrechnen muss, der durch die Produktion und das Spülen der Mehrwegbecher nötig ist. Ex-und-Hopp verschlingt fast immer unnötig viele Ressourcen, außerdem entstehen Entsorgungsprobleme. Die Produktion von einem Kilo Plastik verursacht nach Angaben des Öko-Instituts im Schnitt drei Kilogramm Treibhausgase. Wird das Material nicht recycelt, steigt die Bilanz auf fünf Kilogramm CO<sub>2</sub> – da wieder Neumaterial aus Erdöl hergestellt werden muss und auch in der Müllverbrennung nur ein Teil der Energie zurückgewonnen werden kann. Die Hälfte aller Gegenstände aus Kunststoff, die jährlich produziert werden, sind Einwegprodukte. Wer Plastik spart, hilft also dem Klima. Eine längere Lebensdauer und bessere Reparaturmöglichkeiten der Produkte könnten helfen, das Müllproblem einzudämmen sowie Treibhausgase einzusparen. Allerdings passiert in vielen Bereichen das Gegenteil: Die Nutzungsdauer von Elektrogeräten ist oft sehr kurz. Die ökonomische Logik der Wegwerfgesellschaft zu durchbrechen, wird daher immer wichtiger. Schätzungen dazu, wie stark nachhaltiges Produzieren und Konsumieren den Energieverbrauch senken könnten, gibt es allerdings nicht. Dazu sind die vielen unterschiedlichen Produktgruppen, Nutzungsarten und globalen Lieferketten zu komplex. Das sollte aber kein Hindernis sein, das Wegwerfen zu beenden. Es ist allerdings nicht davon auszugehen, dass durch ein nachhaltiges Wirtschaften der Ausbau der erneuerbaren Energien gebremst werden könnte. Selbst bei einer radikalen Abkehr vom Wegwerfen wird in Zukunft mehr Ökostrom benötigt: Denn der muss in vielen Bereichen fossile Brennstoffe ersetzen.

Die Produktion von einem Kilo Plastik verursacht nach Angaben des Öko-Instituts im Schnitt drei Kilogramm Treibhausgase. Wird das Material nicht recycelt, steigt die Bilanz auf fünf Kilogramm CO<sub>2</sub> – da wieder Neumaterial aus Erdöl hergestellt werden muss und auch in der Müllverbrennung nur ein Teil der Energie zurückgewonnen werden kann. Die Hälfte aller Gegenstände aus Kunststoff, die jährlich produziert werden, sind Einwegprodukte. Wer Plastik spart, hilft also dem Klima. Eine längere Lebensdauer und bessere Reparaturmöglichkeiten der Produkte könnten helfen, das Müllproblem einzudämmen sowie Treibhausgase einzusparen. Allerdings passiert in vielen Bereichen das Gegenteil: Die Nutzungsdauer von Elektrogeräten ist oft sehr kurz. Die ökonomische Logik der Wegwerfgesellschaft zu durchbrechen, wird daher immer wichtiger. Schätzungen dazu, wie stark nachhaltiges Produzieren und Konsumieren den Energieverbrauch senken könnten, gibt es allerdings nicht. Dazu sind die vielen unterschiedlichen Produktgruppen, Nutzungsarten und globalen Lieferketten zu komplex. Das sollte aber kein Hindernis sein, das Wegwerfen zu beenden. Es ist allerdings nicht davon auszugehen, dass durch ein nachhaltiges Wirtschaften der Ausbau der erneuerbaren Energien gebremst werden könnte. Selbst bei einer radikalen Abkehr vom Wegwerfen wird in Zukunft mehr Ökostrom benötigt: Denn der muss in vielen Bereichen fossile Brennstoffe ersetzen.

Diese Frage stellte Manfred Bonson aus Lüdinghausen

**Klimakippelement: ergrünende Sahara**



**Wir wirtschaften, als gäbe es kein Morgen**

**Weltweit muss der Verbrauch von Rohstoffen um die Hälfte sinken**

VON JOACHIM WILLE

**E**-Autos sollen die Verkehrswege bringen. Doch sind PS-Boliden wie der Tesla X oder der Audi E-tron wirklich die Zukunft der klimafreundlichen Mobilität? Bis zu 2,5 Tonnen schwer, bis zu 770 PS stark – und doch von der EU als „Nullemissionssauto“ eingestuft. Dabei stoßen der Tesla und der Audi wie alle E-Pkw auch CO<sub>2</sub> aus – nur nicht am Auspuff, sondern im (Kohle- und Gas-)Kraftwerk, das einen Teil ihres Fahrstroms produziert.

Große Mengen Treibhausgase entstehen außerdem bereits beim Herstellen der Batterie, die mehrere hundert Kilo zum Gesamtgewicht beiträgt. Solche ökologisch schweren Rucksäcke führen dazu, dass ein E-Auto laut dem Heidelberger Ifeu-Institut rund 150 000 Kilometer fahren muss, bevor es tatsächlich klimafreundlicher ist als ein Benziner oder Diesel.

Der Ausstoß der Treibhausgase muss sinken – auf netto null bis spätestens 2050. Doch das kann nur funktionieren, wenn neben dem direkten Verbrauch fossiler Energien auch die Nutzung der Rohstoffe sinkt. Der weltweit hohe Verbrauch der Ressourcen trägt nach der Analyse des International Resource Panel (IRP), eines Gremiums beim UN-Umweltprogramm Unep, enorm zum CO<sub>2</sub>-Problem bei. Rohstoffgewinnung und -verarbeitung sind laut dem jüngsten IRP-Report von

2019 für die Hälfte der Treibhausgas-Emissionen verantwortlich – und für 90 Prozent des Verlustes an biologischer Vielfalt. Unep-Vizechefin Joyce Msuya kommentierte: „Wir durchpflügen die endlichen Ressourcen des Planeten, als gäbe es kein Morgen.“

Seit 1970 hat sich der globale Ressourcenverbrauch von 27 auf 92 Milliarden Tonnen pro Jahr fast vervierfacht. Geht es so weiter, wird er laut IRP bis 2060 auf 190 Milliarden Tonnen steigen – das wäre ein weiteres Plus von 43 Prozent bei den CO<sub>2</sub>-Emissionen.

**Nur wenig wird recycelt**

Ein Entkoppeln der Wohlstandserzeugung vom Naturverbrauch, wie es schon der Club of Rome vor fast 50 Jahren in „Die Grenzen des Wachstums“ gefordert hat, ist nicht zu sehen. Die Rohstoffproduktivität hat sich, global betrachtet, nicht verbessert. In Deutschland liegt der Pro-Kopf-Ressourcenverbrauch heute zwar niedriger als 2000. In den vergangenen Jahren ist er aber wieder gestiegen.

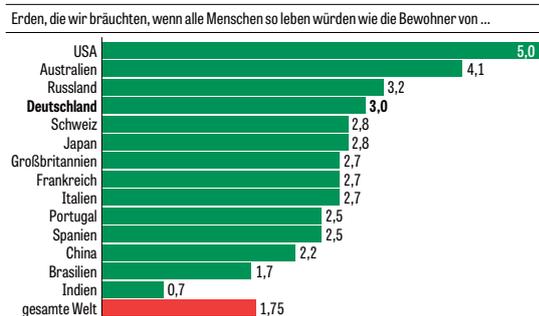
Der Mensch verändert den Globus nach Aussage des im vorigen Jahr verstorbenen Umweltforschers und „Ressourcenpapstes“ Friedrich Schmidt-Bleek stärker als die geologischen Kräfte. Ökologisch wird das zum Problem – vor allem weil im Durchschnitt mehr als 90 Prozent der aus der Natur entnommenen Ressourcen auf dem Weg zur Produktion von

Nahrungsmitteln, Maschinen, Gebäuden oder Fahrzeugen sowie nach dem Gebrauch zu Müll degenerieren. Die Recyclingquoten sind gering. Selbst in der hoch entwickelten europäischen Wirtschaft werden nur 13 Prozent der Ressourcen im Kreislauf geführt, weltweit sind es gar nur sieben Prozent.

Der Schlüssel, um den zu hohen Rohstoffverbrauch und damit auch die Abfallströme zu mindern, liegt in einer Verbesserung der Ressourcenproduktivität – also einer besseren Ausnutzung der Materialien, um die benötigten Dienstleistungen zu erbringen. Weltweit muss die Ressourcennutzung Schmidt-Bleek zufolge mindestens halbiert werden. In den Industrieländern muss der Verbrauch sogar auf ein Zehntel des bisherigen Niveaus sinken. Konzepte dafür gibt es in vielen Bereichen; konsequent umgesetzt werden die Ideen aber bisher nicht.

Bei den Rohstoffen ist also wie beim Klimaschutz eine radikale Trendwende nötig. Abfälle müssen in der Produktion, beim Konsum und bei der Mülltrennung drastisch reduziert werden. Sie sollten am besten erst gar nicht entstehen – denn ein öko-intelligentes Produktdesign kann eine Kreislaufführung auf hohem Niveau ermöglichen. Nötig sind nach Ansicht von Experten eine spürbare Besteuerung von Rohstoffen, ein konsequentes Recycling und veränderte Konsumgewohnheiten.

**Weltweiter Ressourcenverbrauch**



Quelle: Global Footprint Network 2019



Schöne Bescherung? Massive Niederschläge in den Küstenregionen wie im peruanischen Piura führen zu Überflutungen oder Erdbeben.

ERNESTO BENAVIDES/AFP

## Böses Christkind

Der Klimawandel könnte das verheerende Wetterphänomen El Niño im Pazifik verstärken / Von Joachim Wille



### DIE SERIE

**Das Klima kann sich abrupt ändern.** Wenn bestimmte Kippunkte überschritten werden – wenn etwa der Amazonas-Regenwald austrocknet oder die Permafrostböden tauen –, kann es zu Kettenreaktionen kommen. Die Erderwärmung könnte sich dann unkontrollierbar verstärken. Doch noch können wir bei den meisten Kippelementen verhindern, dass sie ausgelöst werden. Wie – das stellt die FR in dieser Serie vor. Mehr Informationen zur Serie finden Sie auf: [fr.de/kippunkte](http://fr.de/kippunkte)

Das Jahr 2020 könnte der Welt einen neuen Temperaturrekord bescheren. Das liegt nicht nur an der fortschreitenden globalen Erwärmung. Eine deutsch-israelische Forschergruppe hat unlängst vorausgesagt, dass im Herbst und Winter ein neuer El Niño auftreten könnte – jenes Wetterphänomen im tropischen Pazifik, bei dem die Oberflächentemperaturen dieses Ozeans in einem großen Gebiet ungewöhnlich erhöht sind. Die Folgen wären wie immer dramatisch bei dieser Klima-Anomalie, vor allem für Länder in Südamerika und Afrika, für Australien, Indien und Indonesien.

Doch die Hitze im Pazifik treibt in El-Niño-Jahren die globale Durchschnittstemperatur zusätzlich nach oben, so wie zuletzt 2016, das als bisher wärmste Jahr seit Beginn der Wetteraufzeichnungen Mitte des 19. Jahrhunderts in die Annalen eingegangen ist. 2020 – oder aber 2021 – könnte, falls die Prognose stimmt, 2016 also toppen. Der El Niño hat es in sich. El Niño heißt auf Spanisch „der Junge“, angespielt wird damit auf das Christkind, weil das

Phänomen immer seinen Höhepunkt in der Weihnachtszeit erreicht, mit freilich ungeliebten Geschenken im Gepäck.

El-Niño-Ereignisse entstehen alle zwei bis sieben Jahre. Normalerweise wehen ganzjährig Passatwinde von Ost nach West. Die sorgen dafür, dass sich Wärme unterhalb der Oberfläche des äquatorialen Pazifik ansammelt. Ist genügend Wärme vorhanden, gelangt sie zuerst im Osten an die Meeresoberfläche des Pazifik und verdrängt dort das kühle Wasser aus dem Humboldtstrom. Dadurch schwächen sich die Passate ab, es gelangt immer mehr Wärme an die Oberfläche und die Winde wehen noch schwächer.

### Eskalation meist just vor Weihnachten

Die Sache eskaliert meist just vor Weihnachten: Die Temperaturen im Wasser vor der Küste Perus sind dann ungewöhnlich hoch, während sich umgekehrt das Wasser vor Australien und Indonesien leicht abkühlt. Die Folgen sind auf allen Anrainer-Kontinen-

ten verheerend. Am bekanntesten sind die Auswirkungen für die Fischereiindustrie an Südamerikas Westküste, vor allem in Peru. Die Fischer fangen kaum noch etwas, denn die Fischschwärme sind wegen des geringen Nahrungsangebots in andere Meeresgebiete abgewandert oder sogar verhungert.

Zudem kommt es in den Küstenregionen häufig zu massiven Niederschlägen, dadurch zu Erdbeben und Überflutungen. An der Ostküste Afrikas sowie in Australien und Indonesien besteht hingegen ein erhöhtes Risiko für Dürren und Waldbrände.

In Indien wiederum kann sich der Verlauf des Monsuns ändern, weswegen Hungersnöte drohen. Was die El-Niño-Ereignisse im Wechselspiel von Atmosphäre und Ozean im Pazifik genau auslöst, ist nicht hundertprozentig klar. Es seien noch nicht alle Prozesse verstanden, räumen Klimaforscher ein. Simulationen mit Klimamodellen deuteten allerdings bereits in den 2000er Jahren an, dass die El-Niño-Ereignisse bei einem ungebremsten Ausstoß von Treibhausgasen häufiger und intensiver werden könnten –

ein mögliches Kippelement im globalen Klimasystem, angetrieben durch eine ungleichmäßige Erwärmung des Pazifik, besonders stark im Osten des Meeres, deutlich weniger stark im Westen.

Außerdem befürchten Klimaforscher eine Verstärkung der „Klimaschaukel“ von Jahr zu Jahr, die von den El Niños und ihrem Gegenstück, den „La Niñas“, gebildet wird. Während eines La-Niña-Ereignisses verstärken sich die natürlichen Temperaturunterschiede im tropischen Pazifik mit der Ausbildung einer weit nach Westen reichenden „Kaltwasserzunge“. Folgen dieses Phänomens sind höhere Niederschläge in Teilen Südostasiens, während es im westlichen Südamerika ungewöhnlich trocken ist.

Tatsächlich gibt es Hinweise, dass die El Niños in den vergangenen Jahrzehnten heftiger geworden sind. Forscher der Universität in australischen Melbourne stellten das 2019 in einer Untersuchung fest, für die sie Daten aus 400 Jahren Klimageschichte ausgewertet hatten. Sie benutzten dazu Bohrkerne von Korallenriffen aus verschiedenen

**Leser fragen**

**Woher kommt der Ökostrom nachts, wenn kein Wind weht?**

Joachim Wille antwortet:

Pazifik-Regionen, deren Wachstumsmuster sich wie Baumringe lesen lassen und damit Aufschluss über die Häufigkeit und Stärke der El Niños geben. Besonders stark waren danach drei dieser Ereignisse in den vergangenen vier Jahrzehnten – die „Super-El-Niños“ von 1982/83, 1997/98 und 2015/2016. Bei letzterem erwärmte sich das Wasser im Pazifik großflächig um bis zu drei Grad, während es bei durchschnittlichen El Niños nur rund 1,5 Grad sind. Die Super-Ereignisse brachten weltweit das Wettergeschehen durcheinander und forderten viele Opfer und Sachschäden. 1997/98 rund 23000 Tote und geschätzt 33 Milliarden US-Dollar an Kosten.

**In anderen Teilen der Welt steigt das Risiko für Dürren**

Allerdings gab es einen so starken El Niño auch schon Ende des 19. Jahrhunderts. Ob es in Zukunft einen Trend zu intensiveren El Niños geben wird, ist unklar. Die Klimaforscher sind sich uneins. „Die Streuung in den verschiedenen Klimamodellen ist sehr breit“, sagt der Kieler Klimaforscher Mojib Latif. „In einigen kommt es zu stärkeren El Niños, in anderen zu schwächeren, wieder andere zeigen gar keine Veränderungen.“ Dass die Gefahr stärkerer Ausprägungen besteht, unterstreicht der Professor vom Geomar Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung allerdings. In dem von den Kieler Wissenschaftlern benutzten Modell jedenfalls habe sich gezeigt, „dass die Erderwärmung besonders starke El-Niño-Ereignisse noch weiter intensivieren kann“.

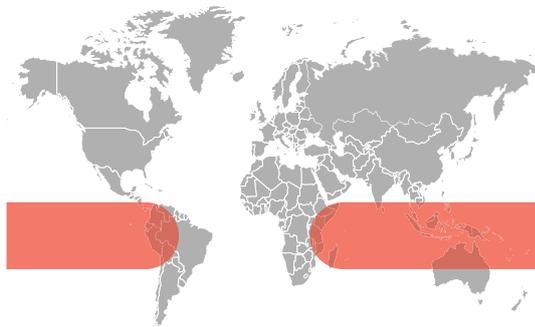
Vorsichtig ist Latif auch in Bezug auf die aktuellen Prognosen des deutsch-israelischen Wissenschaftlerteams, das die Wahrscheinlichkeit für ein El-Niño-Jahr 2020 mit 80 Prozent angibt. Die Experten haben dafür einen Algorithmus entwickelt, mit dem die Lufttemperaturen im Pazifikraum analysiert werden. Dieser mache eine Vorhersage deutlich früher als bisher möglich, während die konventionellen Methoden allenfalls sechs Monate Vorwarnzeit erlaubten, erläutert der Gießener Physikprofessor Armin Bunde, der an der Studie beteiligt war.

Latif hofft zwar, dass die Kollagen mit der neuen Methode erfolgreich sind, denn frühe Vorhersagen erleichtern die Vorkehrungen gegen Dürren oder Überschwemmungen. Aber er erinnert an das Jahr 2014. „Da sah es auch nach einem starken El Niño aus. Doch dann gab es unerwartete Störungen in der Atmosphäre, die das komplett ausgehebelt haben.“ Die Krise kam dann erst ein Jahr später.

Der Anteil der Erneuerbaren an der Stromversorgung ist seit Einführung des EEG im Jahr 2000 deutlich gestiegen. 2019 betrug er rund 46 Prozent. Am Neujahrstag 2018 morgens um sechs Uhr wurde Deutschland erstmals komplett mit Ökostrom versorgt, bei allerdings vergleichsweise niedrigem Verbrauch. Seither gibt es häufiger Tage, an denen Wind, Sonne, Wasser und Biomasse sehr hohe Anteile des Verbrauchs auch an normalen Tagen decken. Komplett „Dunkelflauten“ hingegen sind selten, aber sie kommen vor. Trotz der fluktuierenden Einspeisung von Ökostrom ist das deutsche Netz in internationalen Vergleich sehr sicher, weil es genügend flexible Backup-Kapazitäten gibt – konventionelle Kraftwerke, die einspringen können. Das kann auf Dauer aber nicht die Lösung sein. In einem Stromsystem mit steigenden Anteilen erneuerbarer Energien müssen andere Lösungen her. Und die erscheinen in den nächsten zwei bis drei Jahrzehnten bis zur Komplettumstellung auf Ökostrom durchaus machbar: Wasser, Biogas und Holz liefern bereits heute einen Sockel dauerhaft verfügbarer Stroms von rund zehn Prozent. Um bei einer Dunkelflaute den Rest des Bedarfs abzudecken, braucht es Kurz- und Langfrist-Stromspeicher. Dafür gibt es ausreichend viele Technologien, darunter Batterie-, Pumpspeicher-, Druckluft-, Biogas- und Wärmespeicher. Unter entsprechenden Rahmenbedingungen könnten sie heute schon weit mehr zum Einsatz kommen. Große Erwartungen werden auch in die „Power to Gas“-Technologie gesetzt – dabei werden mit Ökostrom synthetische Gase erzeugt, gespeichert und bei Bedarf „verstromt“. Abfedern lassen sich Schwankungen in der Ökostromproduktion künftig auch durch ein europaweit besser integriertes Stromsystem (Motto: Irgendwo weht immer Wind) und mehr Flexibilität bei der Nachfragesteuerung, etwa wenn Großverbraucher ihre Produktion anpassen. Studien zufolge lassen sich Schwankungen in der Stromproduktion bei Extremwetter damit überbrücken. Die Gefahr der Dunkelflaute – eine Wortschöpfung von Energiewendegegnern übrigens – sollte nicht überbewertet werden.

Diese Frage stellte André Wolf (Blogkommentar)

**Klimakippelement El Niño**



**Autarke Gebäude**

Wie man fast ohne Energieverbrauch und CO<sub>2</sub>-neutral wohnen kann

VON SANDRA KIRCHNER UND JOACHIM WILLE

Schlecht isolierte Gebäude sind CO<sub>2</sub>-Schleudern. Bis zu 160 Kilowattstunden Energie je Quadratmeter (kWh/m<sup>2</sup>) braucht es pro Jahr, um ein unsaniertes Einfamilienhaus aus den 1970er Jahren zu beheizen und mit Warmwasser zu versorgen. Das entspricht 15 Litern Heizöl. Bei noch älteren Gebäuden kann der Verbrauchswert sogar über 300 kWh/m<sup>2</sup> liegen. Entsprechend hohe CO<sub>2</sub>-Emissionen werden beim Heizen mit Heizöl oder Erdgas verursacht. Doch das ist heute nicht mehr zeitgemäß – auch der Sektor Wohnen muss bis spätestens 2050 klimaneutral sein.

Wie das funktioniert, zeigt das in Deutschland in den 1990er Jahren entwickelte Konzept des „Passivhauses“, das fast ohne Heizung auskommt und damit eine wahre Revolution im Hausbau darstellte. Als der Darmstädter Bauphysiker Wolfgang Feist in einer deutsch-schwedischen Kooperation damals das Konzept der in Skandinavien für Neubauten bereits üblichen „Niedrigenergiehäuser“ auf die Spitze trieb, gelang es, den Energieverbrauch extrem abzusenken – auf weniger als 15 kWh pro Quadratmeter im Jahr.

„Passive“ Quellen wie die Sonneneinstrahlung, die Abwärme von technischen Geräten und die Körperwärme der Bewohner decken den Wärmebedarf fast komplett ab – daher der Name. Hauptkennzeichen von Passivhäusern sind Superdämmung sowie Superfenster mit Dreifachverglasung

und gedämmten Fensterrahmen, die wenig Wärme nach draußen dringen lassen. Die Gebäudehülle ist luftdicht ausgeführt, und es gibt eine automatische Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung. Die dicken Wände werden entweder komplett aus gut isolierenden Steinen gebaut oder bestehen aus einer tragenden Konstruktion, etwa aus Stein, Stahlbeton oder Holzständer, plus einer bis zu 35 Zentimeter starken Dämmung. Sie kann aus Steinwolle, Styropor, Zellulose oder Holzdämmplatten bestehen.

**Es gibt Plusenergiehäuser**

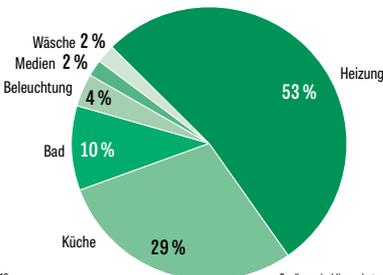
Das erste Passivhaus wurde Anfang der 1990er Jahre als Experimentalthaus im südhessischen Darmstadt gebaut. Feist selbst bezog mit seiner Familie eine der vier Wohnungen des Gebäudes. Inzwischen werden aber nicht nur Wohnhäuser in diesem Standard gebaut, sondern auch Büros, Schulen, Krankenhäuser und sogar ein Kino. Ein Vorreiter ist Heidelberg. Dort entsteht die größte zusammenhängende Passivhausiedlung mit 3700 Wohnungen. Auch Altbauten sind bereits zu Passivhäusern umgebaut worden.

Das Konzept lässt sich übrigens auch an andere klimatische Bedingungen anpassen: Auch in Südkorea oder in den USA stehen mittlerweile solche Energiesparhäuser. Inzwischen gibt es noch weiter gehende Konzepte: energieautarke Häuser, die sich dank Solarkollektoren und Wärmespeichern komplett selbst versorgen, oder „Plusenergiehäuser“, die so-

gar mehr Energie produzieren, als in ihnen verbraucht wird. Die größte Herausforderung für den Klimaschutz im Gebäudesektor ist jedoch, den Altbaubestand CO<sub>2</sub>-neutral zu machen. Zwar sind die Energiebedarfe stetig gesunken, seit unter dem Druck der Ölpreiskrisen der 1970er Jahre die erste Wärmeschutzverordnung erlassen wurde, die Doppelglasfenster und Dämmstandards vorschrieb.

Doch die Energiesanierung der Altbauten kam nicht ausreichend in Schwung. Das „Klimapaket“ der Bundesregierung könnte nun einen Schub bringen, denn Heizungs-austausch, effiziente Fenster und Dämmung werden durch Zuschüsse oder Steuerabschreibungen kräftig gefördert. Um den Bestand aber wirklich klimaneutral zu machen, muss ein Teil der Energie durch Erneuerbare wie Solarkollektoren, elektrische Wärmepumpen, Holzpellets oder synthetisches Ökogas bereitgestellt werden. Zudem deutet sich ein weiterer Umbruch an: Wie viel Energie benötigt wird, um Baustoffe herzustellen, spielt bei den gesetzlichen Vorgaben bisher keine Rolle – und das sollte sich ändern. „Man bleibt auf einem Auge blind, wenn man nur die Emissionen der Nutzungsphase zählt“, sagt Ulrich Wischnath vom gemeinnützigen Verein „Bauwende“. Besonders die Nutzung von Zement wird kritisch gesehen, bei dessen Herstellung sehr viel CO<sub>2</sub> entsteht. So sollten künftig mehr Baustoffe aus nachwachsenden Rohstoffen zum Einsatz kommen, die zudem CO<sub>2</sub> speichern – vor allem Holz.

**Wo entstehen im Haushalt die meisten CO<sub>2</sub>-Emissionen?**



Stand 02/2018

Quelle: mein-klimaschutz.de/Umweltbundesamt



Während des Monsuns fallen in Indien normalerweise drei Viertel der jährlichen Regenmenge. 2019 war es deutlich mehr, sodass viele Regionen überflutet wurden.

DPA

## Wie ein Pendel zwischen den Extremen



### DIE SERIE

Das Klima kann sich abrupt ändern. Wenn bestimmte Kippunkte überschritten werden – wenn etwa der Amazonas-Regenwald austrocknet oder die Permafrostböden tauen –, kann es zu Kettenreaktionen kommen. Die Erderwärmung könnte sich dann unkontrollierbar verstärken.

Doch noch können wir bei den meisten Kippelementen verhindern, dass sie ausgelöst werden. Wie – das stellt die FR in dieser Serie vor. Mehr Informationen zur Serie finden Sie auf: [fr.de/kipppunkte](http://fr.de/kipppunkte)

Globale Erwärmung und Luftverschmutzung könnten den indischen Monsun unberechenbar machen – mit verheerenden Folgen für Hunderte Millionen Menschen / Von Joachim Wille

Indien, voriges Jahr, Anfang Oktober. Die Monsun-Zeit mit ihren starken Regenfällen ist eigentlich schon vorbei. Trotzdem suchen schwere Unwetter vor allem den Norden und den Osten des Landes heim. In Patna, der Hauptstadt des Bundesstaates Bihar, müssen Hunderte Menschen tagelang in ihren überfluteten Häusern warten, bis Hilfe sie erreicht.

Normalerweise kommt der Monsun jedes Jahr zwischen Juni und September nach Indien, in dieser Zeit fallen drei Viertel der jährlichen Regenmenge. Diesmal aber ist er besonders heftig, viele Regionen stehen lange Zeit komplett unter Wasser. Stürme mit extremen Regenfällen und Gewittern decken viele Dächer ab, bringen Bäume und Strommasten zum Umstürzen. Es kommt zu Erdbeben, Schlammlawinen reißen ganze Straßen weg. Mehr als 1600 Menschen sterben. Die meisten von ihnen werden unter ihren Häusern begraben, die aufgrund

der Regenmassen einstürzen; viele ertrinken. Auch über Todesfälle durch Blitzschlag und Schlangenbisse im Hochwasser wird berichtet. Ein Déjà-vu – denn auch 2017 gab es extreme Niederschläge, durch die mehr als 2000 Menschen umkamen. Die Regenfälle des Monsuns 2016 hingegen waren viel zu schwach ausgefallen; das hatte in der stark landwirtschaftlich geprägten Region eine Dürrekatastrophe zur Folge.

#### Ein schwacher Monsun kann Missernten auslösen

Das jährliche, für die Tropen rund um den Erdball charakteristische Wetterphänomen Monsun hat eine immense Bedeutung für das Leben der Menschen in Indien und den angrenzenden Ländern. Die Niederschläge entstehen durch warme Winde, die über dem indischen Ozean viel Wasser aufnehmen und in Richtung Festland we-

hen – dort stoßen sie an die Gebirge, die West- und Ostghats sowie den Himalaya, und regnen ab.

Vom Einsetzen des Sommermonsuns, seiner Dauer und der Verteilung der Niederschläge hängen die landwirtschaftlichen Erträge ab. Ein schwacher Monsun ist häufiger mit ausgeprägten Dürren verbunden, die Missernten auslösen können. Umgekehrt führen stärkere Niederschläge in dieser Regenzeit oft zu schweren Überschwemmungen, so wie 2017 und 2019. Die Folgen können gravierend sein – allein der asiatische Sommermonsun betrifft weit über die Hälfte der Weltbevölkerung.

Beides, sowohl lang anhaltende Trockenheit als auch verheerende Überflutungen, trat in der jüngeren Vergangenheit in Teilen Indiens, Bangladeschs und Pakistans wiederholt auf. Wissenschaftler treibt die Frage um, wie sich die Erderwärmung auf den Monsun auswirkt – und ob er eines der Kippelemente des Klimasystems

sein könnte. Rekonstruktionen der Klimageschichte haben nämlich gezeigt, dass der Monsun sehr sensibel auf äußere Einflüsse reagieren kann. Der menschliche Einfluss hat hier zwei Hauptkomponenten: einerseits die globale Erwärmung, ausgelöst durch die steigende Treibhausgas-Konzentration in der Atmosphäre; andererseits die Abkühlung, die durch die starke Luftverschmutzung in Asien bewirkt wird.

Die Aufheizung zeigt sich besonders stark über Land, das sich schneller erwärmt als der Ozean. Die sommerlichen Hitze-Tiefs in der Atmosphäre werden dadurch verstärkt, es bilden sich mehr Wolken. Die Folge: Der Monsun wird heftiger, es fallen mehr Niederschläge. Doch es finden auch gegenläufige Prozesse statt. So enthält die Luft in Ländern wie Indien durch Kohlenutzung, Verkehrsemissionen und das vielerorts übliche Abbrennen von abgetrennten Feldern sehr viele schwe-

**Leser fragen**

**Wie kann trotz des Widerstands vieler Bürger die Windkraft ausgebaut werden?**

**Joachim Wille antwortet:**

bende Teilchen. Aerosole genannt. Diese Aerosole streuen und reflektieren das Sonnenlicht, so dass weniger Strahlung bis zum Erdboden gelangt. Ebenfalls abkühlend wirken Waldrodungen, die die Erdoberfläche heller machen und so die Rückstrahlung (Albedo) des Sonnenlichts erhöhen. Diese Effekte bremsen die Erwärmung der Luft über dem Subkontinent.

**Die Niederschläge könnten schwer vorherzusagen sein**

Ob sich die Verstärkung oder die Abschwächung des Monsuns künftig stärker durchsetzen wird, ist noch nicht ausreichend geklärt – allerdings gibt es Hinweise auf eine höhere Intensität. Der frühere Direktor des Potsdam-Instituts für Klimafolgenforschung (PIK), Hans Joachim Schellnhuber, ist jedoch sicher: „Insgesamt ist für das 21. Jahrhundert mit spürbaren Veränderungen im Hinblick auf Intensität, räumliche Ausdehnung und jahreszeitliches Einsetzen des Monsuns zu rechnen.“ Er warnt, dass ein ungebremster Klimawandel die Pendelbewegung zwischen trockenen und nassen Extremen voraussichtlich verstärken werde. „Das würde die für die Landwirtschaft essenzielle Vorhersagbarkeit der saisonalen Witterung enorm verschlechtern.“

Für PIK-Professorin Jelena Surowjatkina steht fest, dass die schweren Unwetter des vorigen Jahres von der Erderwärmung mitverursacht wurden. Nach ihren Untersuchungen hat die Erwärmung den indischen Sommermonsun in zweierlei Hinsicht beeinflusst: In den vergangenen zehn Jahren nahm die Intensität der Regenfälle in Zentralindien zu, außerdem verzögerte sich der Rückzug des Monsuns um zwei bis drei Wochen.

Auch Surowjatkina erwartet, dass der Monsun bei weiterer globaler Erwärmung immer unberechenbarer wird. Im vergangenen Jahr habe der Monsun einer „undichten Decke“ geähnelt, anstatt den gesamten Subkontinent allmählich durch Schauer zu bewässern. Die Wissenschaftlerin sieht die Tendenz, dass die Niederschläge anders als bisher überhaupt nicht mehr enden, allerdings unregelmäßig kommen und schwer vorhersehbar sind.

Umso wichtiger ist es, die Prognosen zu verbessern – ein Forschungsgebiet der Wissenschaftlerin. Und hier gibt es Fortschritte. Surowjatkina ist es in den vergangenen vier Jahren gelungen, den Beginn und das Ende der Monsunsaison mit einer neuen Vorhersagemethode über einen Monat im Voraus mit großer Genauigkeit zu bestimmen. Sogar in dem besonders komplexen Monsunjahr 2019 lag sie richtig. Ein großer Vorteil für die Landwirte, die zum Beispiel die Aussaat besser planen können.

Die Windkraft galt lange als Zugpferd der erneuerbaren Energien. Sie liefert inzwischen rund ein Viertel des in Deutschland verbrauchten Stroms. Zuletzt ist der Ausbau aber eingebrochen: 2019 kamen nur noch Anlagen mit rund einem Gigawatt (GW) Leistung hinzu, in der Spitze waren es 5,3 GW gewesen. Ursachen sind die Umstellung auf Ausschreibungen, langwierige Genehmigungsverfahren und Klagen von Anwohnern. Hinzu kommen in manchen Bundesländern Abstandsregelungen, die die potenziellen Flächen für neue Windkraftanlagen schrumpfen lassen. Hier muss angesetzt werden. Denn ohne einen kräftigen Zuwachs bei den erneuerbaren Energien droht in den kommenden Jahren in Deutschland eine Stromlücke, Importe wären nötig. Das zeigt eine aktuelle Analyse des Thinktanks Agora Energie. Auch die Windkraft muss wieder stärker zulegen, je nach Szenario im Schnitt um rund zwei bis fünf GW pro Jahr. Das ließe sich erreichen. Die Mehrheit der Bürger steht dem Ausbau positiver gegenüber: Bei einer Umfrage Ende 2019 meinten 82 Prozent, sie sei „wichtig“ oder „sehr wichtig“. Auch 78 Prozent der Befragten, in deren Wohnumfeld sich ein Windrad dreht, sind mit diesem einverstanden. Um die Akzeptanz zu erhöhen, ist eine frühe und transparente Beteiligung der Betroffenen wichtig. Das Umweltbundesamt hat statt pauschaler Abstandsregelungen, wie sie auch das Bundeswirtschaftsministerium geplant hat, eine Einzelfallabwägung vor Ort vorge schlagen. Zudem kommt es darauf an, die betroffenen Anwohner von den Windparks finanziell profitieren zu lassen – etwa durch eine direkte Beteiligung der Kommunen an den Umsätzen der Betreiber, direkte Geldflüsse an die Bürger oder günstigere Stromtarife für sie. Bürgerwindparks, etwa in Schleswig-Holstein, zeigen, dass das funktionieren kann. Ein weiterer wichtiger Aspekt ist eine bedarfsgerechte Beleuchtung der Windräder, wenn Hubschrauber sich nähern, statt des bisher üblichen Dauerblinkens in der Nacht. Eine aktuelle Gesetzesänderung macht das möglich.

Ebenso kommt es auf eine Standortauswahl an, die auf besonders gefährdete Vogelarten Rücksicht nimmt.

Diese Frage stellte Jürgen H. Winter aus Schöneck

**Klimakippelement Monsun, am Beispiel Indien**



**Nullsummenspiel oder moderner Ablasshandel?**

Das Kompensieren klimaschädlichen Verhaltens mit Geld ist umstritten

VON SUSANNE SCHWARZ

Flüge, Veranstaltungen, Fleischkonsum: Mehr oder weniger alle Produkte und Dienstleistungen verursachen klimaschädliche Treibhausgase. Wer seinen Klima-Fußabdruck rechnerisch ausgleichen will, kann das über eine Zahlung an Kompensationsorganisationen tun. Das ist inzwischen über viele Anbieter möglich, etwa den Marktführer Atmosfair, die Klimakollekte oder Myclimate. Das Prinzip: Wer kompensieren will, zahlt Geld an den Dienstleister, der damit Klimaschutzprojekte unterstützt – oft, aber nicht nur in Entwicklungsländern.

Damit ist es natürlich nicht möglich, den eigenen Fußabdruck wieder rückgängig zu machen: Das CO<sub>2</sub> bleibt in der Luft. Dafür wird durch die Zahlung dieselbe Menge CO<sub>2</sub> an einem anderen Ort auf der Welt eingespart. Selbst im Idealfall senkt die Kompensation also die klimaschädlichen Treibhausgasemissionen nicht, sondern ergibt ein Nullsummenspiel. Immerhin. Oder?

„Wir empfehlen die Kompensation – allerdings nur als letzten Schritt“, sagt Frank Wolke vom Umweltbundesamt (UBA). „Im Vorfeld sollte man sich überlegen: Wo kann ich meine Emissionen vermeiden oder vermindern?“ Eventuell kann die Dienstreise über den Atlantik einfach zugunsten einer Online-Konferenz abgesagt werden. Den Urlaub kann

man als Zug- statt als Flugreise planen. „Das zu kompensieren, was nach allen Anstrengungen noch an Emissionen übrigbleibt, halten wir für sinnvoll“, meint Wolke.

Aus der Klimaschutzbewegung kommen oft skeptische Stimmen. Die Befürchtung: Statt strikt so vorzugehen, wie Wolke es empfiehlt, könnten viele die Kompensation eher zur Rechtfertigung für klimaschädliches Verhalten nutzen. Aus dem Nullsummenspiel würde dann ein Ablasshandel. Die schwedische Klimaaktivistin Greta Thunberg zum Beispiel sprach schon von einem „Klimakompensations-Bluff (...)“, der aller Wahrscheinlichkeit nach in den meisten Fällen mehr schadet als nützt.“

**Unterschiedliche Standards**

Hinzu kommt, dass die verschiedenen Anbieter unterschiedliche Standards haben. Wer seinen CO<sub>2</sub>-Fußabdruck kompensieren will, sollte genau hinschauen, was mit dem Geld passiert. „Man sollte darauf achten, dass der Anbieter seine Arbeit sehr transparent macht: Welche Klimaschutz-Projekte finanziert er, mit welchen Standards sind sie zertifiziert, wie verhindert er die doppelte Zählung von Emissionseinsparungen?“, erklärt UBA-Experte Wolke. Ein guter Anbieter gebe zudem einen Hinweis darauf, wie viel Geld in das Klimaschutzprojekt fließe und wie viel in seine eigenen Kosten.

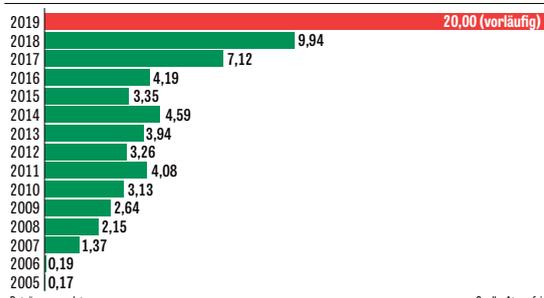
Der Ökonom Franz Josef Radermacher setzt große Hoffnung ins Kompensieren. Er spricht von einem „Milliarden-Joker“, mit dem die Klimaschutz-Lücke geschlossen werden könne: Privatleute, Unternehmen und andere Organisationen sollen freiwillig und im großen Stil CO<sub>2</sub>-Kompensationsprojekte in Entwicklungsländern finanzieren, dort zum Aufbau einer klimafreundlichen Wirtschaft beitragen, und sich selbst dadurch „klimaneutral“ stellen. Deutschland könnte Rademacher zufolge seine Emissionen so bis 2025 auf null senken.

Als Modell für globalen Klimaschutz taugt das aber wohl nicht. Das zeigt ein einfaches Zahlenspiel: Die zehn größten Industrieländer verursachen allein rund 66 Prozent der weltweiten CO<sub>2</sub>-Emissionen. Selbst wenn alle übrigen Länder allein durch Kompensationsprojekte ihre Emissionen komplett auf null senken könnten, wären nur 34 Prozent der aktuellen Treibhausgasemissionen eingespart. Auch die Menschen in den Industrieländern kommen also nicht drum herum, ihre eigene Wirtschafts- und Lebensweise umzustellen.

Trotzdem steht die CO<sub>2</sub>-Kompensation im Fokus der internationalen Politik. Etliche Staaten wollen untereinander mit Klimaschutzern handeln. Aber: Gemeinsame Regeln, um nicht in die vielen möglichen Fallen zu tappen, gibt es trotz jahrelanger Verhandlungen noch nicht.

**Bereitschaft zur CO<sub>2</sub>-Kompensation**

Am Beispiel der Organisation Atmosfair, Einnahmen aus Klimaschutzbeiträgen in Millionen Euro



**575**  
TAUSEND

Flüge wurden 2019 über die Organisation Atmosfair kompensiert

Quelle: Atmosfair

## KIPPPUNKTE

- 1: Schmelzen des arktischen Meereises, des grönländischen und des antarktischen Eisschildes
- 2: Absterben der tropischen Korallenriffe
- 3: Methanfreisetzung durch tauende Permafrostgebiete
- 4: Abschwächung des Golfstroms
- 5: Ergrünen der südlichen Sahara, Verlagerung des westafrikanischen Monsuns
- 6: Störungen des Wetterphänomens El Niño
- 7: Destabilisierung des indischen Monsuns
- 8: Austrocknung des Amazonas-Regenwalds, Rückgang der borealen Wälder
- 9: Abschwächung der marinen „Kohlenstoffpumpe“
- 10: Verlangsamung oder Einrasten der Wellen des Jetstreams
- 11: Austrocknung des nordamerikanischen Südwestens



Das Land des Huni-Kuin-Stamms im Westen Brasiliens wurde von örtlichen Bauern angezündet.

DAVID TESINSKY/ZUMA WIRE

## Showdown am Amazonas

Der größte Regenwald der Erde gilt als bedrohtes Kippelement des Klimasystems

Von Joachim Wille



## DIE SERIE

Das Klima kann sich abrupt ändern. Wenn bestimmte Kippunkte überschritten werden – wenn etwa der Amazonas-Regenwald austrocknet oder die Permafrostböden tauen –, kann es zu Kettenreaktionen kommen. Die Erderwärmung könnte sich dann unkontrollierbar verstärken. Doch noch können wir bei den meisten Kippelementen verhindern, dass sie ausgelöst werden. Die wichtigsten stellt die FR in dieser Serie vor. Mehr Informationen zur Serie finden Sie auf: [fr.de/kippunkte](http://fr.de/kippunkte)

Sein Spitzname ist „Tropen-Trumpf“. Das Wahlprogramm von Brasiliens neoliberalen Präsidenten Jair Bolsonaro umfasst als einen zentralen Punkt die weitere Öffnung des Amazonas-Regenwaldes für die Agrar- und Rohstoffindustrie: Den indigenen Völkern in ihren Schutzgebieten wolle er „keinen Zentimeter“ lassen.

Und dieses Programm setzt er seit seinem Amtsantritt Anfang 2019 konsequent um. Im vorigen Sommer schockte die große Zahl von Feuern im Amazonasgebiet die Weltöffentlichkeit – Folge von Brandrodungen für neue Sojafelder, Rinderweiden, Infrastruktur. Ein unter Druck geratener Bolsonaro sah sich am Ende sogar gezwungen, das Militär zu schicken, um bei der Bekämpfung der völlig außer Kontrolle geratenen Feuer zu helfen.

Der Amazonas-Regenwald ist das größte tropische Regenwaldgebiet der Erde, er umfasst anderthalbmal die Fläche der Europäischen Union. Er gilt als „Klimamaschine“ und „grüne Lunge“ des Globus, dort findet rund ein Viertel des Kohlenstoff-Austauschs zwischen Atmosphäre und Biosphäre statt. Außerdem beherbergt er einen ungeheuren Artenreichtum, nämlich

## BOREALE WÄLDER

Die borealen Wälder in Nordeuropa, Asien und Nordamerika stellen mit rund 15 Millionen Quadratkilometern mehr als ein Drittel der globalen Waldfläche. Sie erstrecken sich in etwa zwischen dem 50. und dem 70. Breitengrad. Es sind hauptsächlich Nadelwälder, die im hohen Norden in die baumlose Tundra und am südlichen Rand in den Wald gemäßigter Breiten übergehen, wie er in Deutschland zu finden ist. Sie haben eine ökologisch, aber auch ökonomisch wichtige Funktion; rund 90 Prozent des Bedarfs an Papier- und Schnittholz werden hier gedeckt.

Der Klimawandel setzt die Bäume zunehmend unter Stress – durch Schädlinge, Stürme, Trockenheit, höhere Brandgefahr. Klimaforscher erwarten, dass die Wälder ab einer globalen Erwärmung um etwa drei Grad zusammenbrechen und von Busch- und Graslandschaften verdrängt werden. Der Rückgang könnte aber auch früher einsetzen. Als Warnzeichen gilt, dass 2019 am nördlichen Polarkreis Brände in bisher unbekanntem Umfang wüteten, unter anderem in Sibirien und Alaska. Ein Verschwinden der borealen Wälder würde nicht nur den Lebensraum vieler Tiere vernichten, sondern auch eine massive CO<sub>2</sub>-Freisetzung und damit Beschleunigung der Erderwärmung bedeuten. jw

etwa zehn Prozent der weltweiten biologischen Vielfalt.

Was in der Aufregung über die Brände 2019 kaum beachtet wurde: In früheren Jahrzehnten gab es Zeiten mit noch stärkerer Waldvernichtung, etwa in den 1980er Jahren, als die Umweltkrise am Amazonas erstmals richtig Fahrt aufnahm, oder Anfang der 2000er.

Bolsonaros neue Attacke ist deshalb so gefährlich, weil sie in einem bereits stark in Mitleidenschaft gezogenen Ökosystem stattfindet. Der Wald ist vielerorts nicht mehr geschlossen, sondern besteht zum Beispiel im brasilianischen Teil, der rund 60 Prozent ausmacht, aus über 300 000 Fragmenten. Wissenschaftler befürchten, dass er beim weiteren Fortschreiten der Vernichtung kollabieren könnte – er ist damit eines der Kippelemente im globalen Klimasystem.

Die brasilianische Weltraumbehörde Inpe schätzt, dass die kritische Marke bei einer Vernichtung von 20 bis 25 Prozent der Gesamtfläche liegt. Dieser Kippunkt ist womöglich nicht mehr fern. Verloren sind bereits rund 17 Prozent, und eine ähnlich große Fläche gilt als geschädigt. Andere Experten sehen den Kippunkt noch nicht so nahe. Doch auch sie befürchten, dass

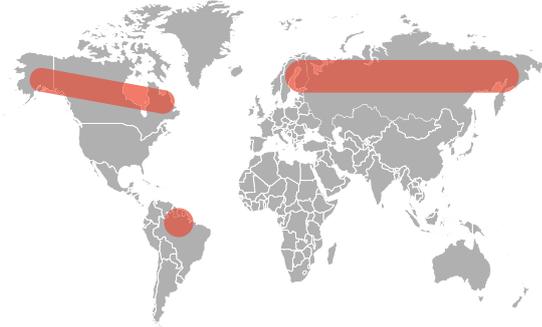
irgendwann große Teile des bisherigen Regenwaldes zu einer offenen Savanne mit Gräsern und einigen Bäumen mutieren – vor allem im Süden der Region. Nach den Prognosen einiger Klimamodelle könnte der Wald im Laufe dieses Jahrhunderts sogar komplett verschwinden.

### Der Wandel zur Savanne deutet sich bereits an

Laut dem brasilianischen Klimaforscher Carlos Nobre und dem US-Biologen Thomas E. Lovejoy deutet sich der Wandel zur Savanne inzwischen bereits an. Im 20. Jahrhundert ist die mittlere Temperatur im Wald um ein bis 1,5 Grad angestiegen, und seit 1970 hat sich die Trockenzeit in Teilgebieten von vier auf fünf Monate verlängert. Die schweren Dürren in den Jahre 2005, 2010 und 2016 sehen Nobre und Lovejoy als Anzeichen, aber auch die starken Niederschläge in den Jahren dazwischen, wie sie 2018 im Magazin „Science“ schrieben.

Möglicherweise beginne das Ökosystem zwischen den beiden Extremen zu taumeln – Vorstufe eines gravierenden Umsturzes. Der Biodiversitätsexperte Lovejoy erläutert: „Ab einer Abholzung von einem Vier-

Kippelement Amazonas-Regenwald und boreale Wälder



tel des Waldes beginnt der Wasserkreislauf zu versagen, der den Amazonas Regenwald versorgt.“ Derzeit verdunstet der Wald noch 20 Billionen Liter Wasser am Tag, das ist mehr, als der Amazonas in den Atlantik spült. Lovejoy warnt: „Das System droht in Kürze zu kippen.“

**Wird Brasilien den Regenwald aufforsten?**

Mit einem Versagen der gigantischen „Wettermaschine“ am Amazonas würde wohl ganz Südamerika in eine Krise gestürzt, unter anderem könnte die Agrarproduktion stark zurückgehen. Doch nicht nur für die Region wären die Folgen fatal, auch der Klimawandel würde weiter beschleunigt, da der Regenwald dann als CO<sub>2</sub>-Speicher ausfele. Bereits heute ist diese Funktion beeinträchtigt, wie eine jüngst vorgelegte Studie eines internationalen Forscherteams zeigt. Danach verliert der Amazonas-Wald bereits seit 30 Jahren sukzessive die Fähigkeit, CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre aufzunehmen und in der Biomasse zu speichern.

Schon Mitte der 2030er Jahre könne er sogar zu einer Quelle von Treibhausgasen werden, erwarten die Experten um Geografieprofessor Simon Lewis von der Universität Leeds in Großbritannien. Lewis kommentiert: „Wir haben festgestellt, dass eine der besorgniserregendsten Auswirkungen des Klimawandels bereits begonnen hat. Das ist selbst den pessimistischsten Klimamodellen um Jahrzehnte voraus.“

Brasilien hat sich zwar im Rahmen des Paris-Abkommens von 2015 verpflichtet, bis 2030 rund 120 000 Quadratkilometer Wald wiederaufzuforsten. Doch die Chancen, dass das geschehen wird, erscheinen unter Bolsonaro gering. Zwar kündigte die Regierung im Januar die Gründung eines „Amazonas-Rats“ an, der den Schutz des Gebiets koordinieren soll, Experten sehen darin aber nur ein Feigenblatt.

Die aktuelle Politik fördert das Gegenteil. Ende 2019 hat Brasilia ein Verbot des Zuckerrohranbaus im Amazonasgebiet aufgehoben. Außerdem will die Regierung ein Gesetz zur Regulierung von Ölförderung und Bergbau in Indigenen-Gebieten im Nationalkongress verabschieden lassen. Das bedroht weite Teile des dort noch vergleichsweise gut erhaltenen Waldes.

**Die Natur einspannen**

Aufforstung, Wiedervernässung von Mooren und schonende Bodenbewirtschaftung haben ein großes Klimaschutzpotenzial

VON VERENA KERN

Klimaschutz gilt oft als kompliziert und teuer, als „Jahrhundertaufgabe“, vergleichbar mit der ersten Mondlandung. Abgesehen davon, dass fraglich ist, ob man mit solchen Narrativen die Bereitschaft zu entschlossenem Handeln mobilisieren kann – an der Diagnose ist natürlich etwas dran. Für die im Paris-Abkommen vereinbarte Klimaneutralität sind grundlegende Veränderungen erforderlich. In praktisch allen Bereichen muss die Infrastruktur umgebaut werden, lange eingespielte Verfahrens- und Verhaltensweisen müssen auf den Prüfstand, ob in Industrie, Handel, Finanzwirtschaft oder bei Mobilität, Städtebau, Konsum und um und.

Einfacher und kostengünstiger verspricht Klimaschutz durch die Natur zu sein. Man setzt auf natürliche Prozesse und sorgt dafür, dass die Natur mehr von dem tun kann, was sie ohnehin tut, wenn der Mensch dies nicht durch Rodung, Flächenversiegelung und Intensivlandwirtschaft verhindern würde – nämlich Kohlenstoff speichern. „Natural Climate Solutions“ heißt dieser Ansatz, und tatsächlich bietet er große Vorteile.

Zunächst einmal ist der Aufwand vergleichsweise gering. Man pflanzt neue Bäume, kümmert sich um die Wiedervernässung von Mooren sowie den Erhalt von Mangrovenwäldern und Torflandschaften. Und man bewirtschaftet Wiesen und Ackerböden so, dass sie

mehr Kohlenstoff aufnehmen und binden können.

Zudem ist das Klimaschutzpotenzial enorm. Elf Milliarden Tonnen CO<sub>2</sub> könnten damit jährlich eingespart werden, errechnete ein internationales Forscherteam vor zwei Jahren in der bislang umfangreichsten Studie zum Thema. Der richtige Umgang mit der Natur könnte so rund 30 Prozent der Emissionen bringen, die für die Pariser Klimaziele nötig sind. Allerdings nur, wenn die Maßnahmen wirklich überall auf der Welt umgesetzt werden.

**Nicht nur Bäume pflanzen**

Für weltweite Schlagzeilen sorgte im Sommer eine Studie der ETH Zürich, die das Potenzial noch deutlich höher ansetzt – und zwar allein durch die Aufforstung von Wäldern. Die sensationelle Nachricht: Würde man überall Bäume pflanzen, wo das Land nicht für Ackerbau oder Städte genutzt wird, könnten zwei Drittel der bisherigen menschengemachten CO<sub>2</sub>-Emissionen rückgängig gemacht werden. Das klingt so schön, um wahr zu sein. Und das war es leider auch. Den Forschern war ein Denkfehler unterlaufen. Tatsächlich ist das Einsparpotenzial höchstens halb so groß.

Und es gibt noch ein Problem. Viele der aktuell noch freien Flächen liegen im hohen Norden und sind lange Zeit schneebedeckt. Würde man sie bewalden, würde weniger Sonnenstrahlung ins All

zurückgespiegelt werden, so dass die Erderwärmung sogar noch angeheizt würde. Der arktische Permafrost würde noch schneller schmelzen. „Hier schlummert mehr Kohlenstoff als in allen Bäumen der Erde zusammen“, sagt der Klimaforscher Stefan Rahmstorf. „Diesen schlafenden Riesen sollten wir keinesfalls wecken.“

Trotzdem ist das Pflanzen neuer Bäume ein wichtiger Beitrag gegen die Klimakrise. Viele Länder, von Großbritannien bis China, haben längst Programme aufgelegt. Und zahlreiche ärmere Staaten wollen ihren Beitrag zum Paris-Abkommen in Form von Aufforstungen leisten. Im vorigen Jahr, als UN-Generalsekretär Guterres zu mehr Klimaschutz aufrief, versprachen Länder wie Äthiopien, Kenia oder auch Pakistan und Neuseeland, mindestens 17 Milliarden Bäume zu pflanzen. Länder wie Kolumbien, Guatemala oder die Demokratische Republik Kongo kündigten an, bestehende Wälder besser zu schützen oder gerodete Flächen wieder aufzuforsten.

Um das Klimaproblem zu lösen, reicht dies aber nicht. Bäume nehmen Kohlenstoff nur langsam auf. Damit sie ihr volles Potenzial entfalten, dauert es 50 bis 100 Jahre. Aufforstung kann deshalb nur ein „Nebendarsteller“ bei der Klimastabilisierung sein, sagt Klimaforscher Hans Joachim Schellnhuber. Die Hauptrolle muss das Vermeiden von Emissionen spielen. An dieser Jahrhundertaufgabe kommt die Menschheit nicht vorbei.

**Leser fragen**

**Wie steht es um den „Strom aus der Wüste“ nach dem Ende des Desertec-Projekts?**

Joachim Wille antwortet:

Die Vision hieß: Desertec. Wüste plus (Solar-)Technik. Die Idee: große Solar- und Windparks in Nordafrika und im Nahen Osten bauen und die dort erzeugte Elektrizität per Gleichstrom-Fernleitung nach Europa transportieren. Doch das Megaprojekt, vorangetrieben vor allem von deutschen Konzernen wie RWE, Eon, Siemens und der Deutschen Bank, platzte im Jahr 2014. Die Vision aber lebt weiter, und sie ist zum Teil bereits Realität.

In der Region sind eine ganze Reihe Solar- und Windkraftwerke gebaut worden, vor allem von Konzernen aus Saudi-Arabien und China, aber auch von der in Sachen erneuerbare Energien sehr aktiven staatlichen Energiegesellschaft in Marokko. Der größte Solarpark der Welt mit 1,18 Gigawatt Leistung steht in Abu Dhabi, in Ägypten wird eine riesige Anlage nach der nächsten eröffnet, und Marokko baut das global größte Solarthermiekraftwerk Noor Midelt 1, das dank eines Speichers Strom rund um die Uhr liefern kann.

Die Preise des Solarstroms sind inzwischen extrem günstig, die Kilowattstunde kostet bei den neuen großen Anlagen unter zwei Cent. Ein weiterer Quantensprung: Noor Midelt 1 liefert den nach Bedarf zur Verfügung stehenden Ökostrom für sechs Cent. Das heißt, regelbare grüne Elektrizität kann damit erstmals mit Strom aus Gaskraftwerken konkurrieren. Experten glauben, dass sich damit auch in vielen anderen Ländern im Sonnengürtel der Erde die Chance auf einen Durchbruch bei Klimaschutz und wirtschaftlicher Entwicklung bietet.

Da der Ökostrom in diesen Regionen so billig ist, wäre neben der Umstellung der Stromversorgung in den jeweiligen Ländern der Aufbau einer Produktion von synthetischen Ökokaft- und Brennstoffen denkbar, die auch exportiert werden könnten, etwa nach Europa. Die Rede ist hier von der „Power to X“-Technologie, die auf dem Verfahren der Elektrolyse basiert. Dabei entsteht Wasserstoff, aus dem Energiegase oder -flüssigkeiten hergestellt werden können – einsetzbar als Ersatz für Erdgas, Diesel, Kerosin oder Heizöl. Ob und in welchen Sektoren deren Nutzung energetisch Sinn macht, ist umstritten – wegen der hohen Umwandlungsverluste. Zudem sind Ökokaftstoffe noch deutlich teurer als konventionelle. Befürworter rechnen aber damit, dass sich das ändern wird, wenn entsprechend große Produktionsanlagen gebaut werden.

Diese Frage stellte Klaus Philipp Mertens aus Frankfurt.

**Jährliche Änderung des Waldbestandes**

In absoluten Zahlen (in Tsd. ha) und in Prozent\* des jeweiligen Gesamtbestandes

	Waldverluste	Waldzuwächse
		China 1542 (0,8%)
		Australien 308 (0,2%)
		Chile 301 (1,8%)
		USA 275 (0,1%)
		Philippinen 240 (3,3%)
	-372 (0,8%)	Tansania
	-410 (5,0%)	Nigeria
	-546 (1,8%)	Myanmar
	-684 (0,7%)	Indonesien
	-984 (0,2%)	Brasilien

\*Durchschnitt der Jahre 2010 bis 2015

Quelle: Daten bpb, Grafik FR

## KIPPELEMENTE

- 1: Schmelzen des arktischen Meereises, des grönländischen und antarktischen Eisschildes
- 2: Absterben der tropischen Korallenriffe
- 3: Methanfreisetzung durch tauende Permafrost-Gebiete, Methan-Ausgasungen aus den Ozeanen
- 4: Abschwächung des Golfstroms
- 5: Ergrünen der Sahara, Trockenheit im Sahel, Versiegen der Staubquellen
- 6: Störungen des Wetterphänomens El Niño
- 7: Destabilisierung des indischen Monsuns, Verlagerung des westafrikanischen Monsuns
- 8: Austrocknen des Amazonas-Regenwalds, Rückgang der borealen Wälder
- 9: Schwächung der marinen biologischen Kohlenstoffpumpe
- 10: Verlangsamung der Wellen des Jetstreams
- 11: Austrocknen des nordamerikanischen Südwestens



Im Meeresboden wird herabsinkendes Plankton zersetzt und für Tausende von Jahren gebunden – und mit ihm auch Kohlendioxid.

ISTOCK

## Kostbarer Meeresschnee

Für den Klimaschutz spielen die Ozeane eine wichtige Rolle: Sie nehmen große Mengen CO<sub>2</sub> auf. Doch diese Kohlenstoff-Pumpe droht schwächer zu werden

Von Joachim Wille



## DIE SERIE

Das Klima kann sich abrupt ändern. Wenn bestimmte Kippunkte überschritten werden – wenn etwa der Amazonas-Regenwald austrocknet oder die Permafrostböden tauen –, kann es zu Kettenreaktionen kommen. Die Erderwärmung könnte sich dann unkontrollierbar verstärken. Doch noch können wir bei den meisten Kippelementen verhindern, dass sie ausgelöst werden. Wie – das stellt die FR in dieser Serie vor. Mehr Informationen zur Serie finden Sie auf: [fr.de/kippunkte](http://fr.de/kippunkte)

Die Weltmeere sind die aktivsten Helfer der Menschen im Kampf gegen die Klimakrise. Kontinuierlich entfernen sie große Mengen Kohlendioxid aus der Luft, lassen so die Konzentration des Gases in der Atmosphäre langsamer steigen und dämpfen damit den globalen Temperaturanstieg. Klimaforscher sehen allerdings Anzeichen dafür, dass diese wichtige Funktion mit weiterer Erwärmung erlahmen könnte. Denkbar ist sogar, dass sie ganz zum Erliegen kommt. Die Folge: Der Klimawandel würde zusätzlich verstärkt.

Der Ozean ist die größte Kohlenstoff-Senke der Erde. Dort ist mehr als 50 Mal so viel CO<sub>2</sub> gespeichert wie in der gesamten Atmosphäre und 20 Mal mehr als in der Biosphäre, also in Pflanzen und Böden. Zwischen Luft und Ozean findet ständig ein Kohlenstoff-Austausch statt, jährlich werden mehr als 90 Milliarden Tonnen umgewälzt – und zwar in beide Richtungen. Dabei ist dieser Austausch, der vor allem in der Ozean-Deckschicht in bis zu 100 Metern Tiefe stattfindet, regional sehr unterschiedlich. So gibt es Zonen mit warmem und aufstei-

gendem Wasser, in denen das Meer von Natur aus eine Quelle von Kohlenstoff ist, vor allem in den Tropen. Und andere Zonen, in denen kaltes und salzreiches Wasser absinkt, dort ist das Meer eine Senke. Hier geht es vor allem um die Ozeane in den höheren Breiten, etwa den Nordatlantik.

### Der Mensch hat das Gleichgewicht verschoben

Doch der Mensch hat in dieses Gleichgewicht eingegriffen. Seitdem er die CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Atmosphäre vor allem wegen des Verbrennens von Kohle, Erdöl und Erdgas sowie des Vernichtens von Wäldern erhöht, hat sich der Austausch verschoben. Pro Jahr werden heute rund 2,2 Milliarden Tonnen Kohlenstoff mehr vom Ozean aufgenommen als abgegeben. Seit Beginn der Industrialisierung um 1800 ist so nach Angaben des Geomar Helmholtz-Zentrums für Meeresforschung in Kiel rund ein Viertel des zusätzlich in die Atmosphäre emittierten CO<sub>2</sub> in den Ozeanen eingelangert worden. Ohne dieses Phänomen wäre die globale Erwärmung, die derzeit rund 1,1 Grad gegenüber vorindustrieller Zeit beträgt, deutlich stärker.

Die Frage, wie viel menschengemachtes Kohlendioxid der Ozean aufnimmt und ob beziehungsweise wie sich das verändert, ist eine der wichtigsten Fragen, um verlässliche Klimaprognosen erstellen zu können. Die Wissenschaftler unterscheiden dabei zwei Wege, auf denen CO<sub>2</sub> ins Meer gelangt: die physikalische Kohlenstoffpumpe und die biologische Kohlenstoffpumpe. Beide laufen Gefahr, wegen des Klimawandels geschwächt zu werden. Von Pumpe wird gesprochen, weil die Menge an Kohlenstoff mit der Wassertiefe zunimmt und der Transport – eben wie bei einer Pumpe – gegen dieses Gefälle erfolgen muss.

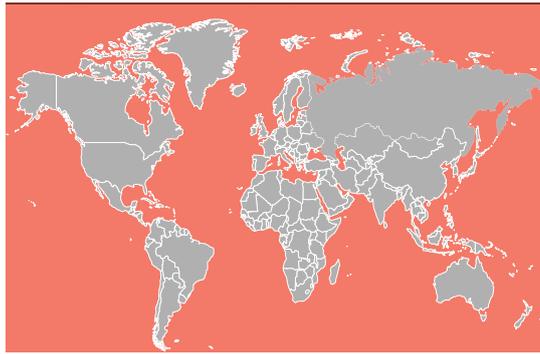
Mehrere Faktoren können die physikalische Pumpe schwächen: die Erwärmung des Meerwassers von oben, wodurch die Schichtung der Wasserschichten stabiler wird; das Abschwächen der natürlichen Umwälzbewegung in den Ozeanen, also etwa des Golfstroms, sowie die zunehmende Ozeanversauerung, die dazu führt, dass das CO<sub>2</sub> im Wasser

schlechter löslich ist. Bislang allerdings funktioniert diese Pumpe unverändert, wie eine Studie eines internationalen Forscherteams unter Leitung von Experten der ETH Zürich aus dem vergangenen Jahr zeigte.

In der Untersuchung gelang es, die Aufnahmeleistung des Meeres für einen Zeitraum von 13 Jahren genau zu bestimmen – die Periode zwischen 1994 und 2007. Es zeigte sich, dass der Ozean netto 26 Prozent des vom Menschen verursachten CO<sub>2</sub> aufnahm: prozentual genauso viel wie in den 200 Jahren zuvor, mengenmäßig jedoch viel mehr als früher. Denn je höher der Gehalt von CO<sub>2</sub> in der Luft ist, desto stärker wird es vom Meer absorbiert – bis dieses irgendwann gesättigt ist.

Allerdings gab es große Unterschiede zwischen verschiedenen Meeresgebieten. So nahm der Nordatlantik in den 13 Jahren rund 20 Prozent CO<sub>2</sub> weniger auf, als er eigentlich sollte. Das habe wahrscheinlich am Schwächeln der nordatlantischen Umwälzpumpe – also des Golfstroms und seiner Verlängerung, des Nordatlantikstroms – Ende der 1990er Jahre gelegen, erläutert ETH-Pro-

Klimakippelement Kohlenstoffpumpe, in den Ozeanen weltweit



## Ein Partydrink aus Kohlendioxid

Wie versucht wird, CO<sub>2</sub> aus der Luft zu holen und zu nutzen

VON JÖRG STAUDE

fessor Nicolas Gruber. Ausgeglichen wurde das allerdings durch eine höhere CO<sub>2</sub>-Aufnahme im Südatlantik – unter dem Strich also ein Nullsummenspiel.

Die biologische Kohlenstoffpumpe funktioniert so: Organismen im Meer wie Kieselalgen, Grünalgen oder Cyanobakterien – das sogenannte Phytoplankton – nehmen CO<sub>2</sub> aus den oberen Wasserschichten auf und wandeln es mittels Photosynthese in Biomasse um. Sterben sie, sinken sie in die Tiefsee ab und werden dort mineralisiert und so für Hunderte bis Tausende von Jahren gebunden. Wissenschaftler nennen die toten Organismen und Kotkugeln, die von oben herabrieseln, Meeresschnee. Höhere Wassertemperaturen könnten diese Pumpe jedoch schwächen.

### Es lohnt sich, die marinen Ökosysteme zu schützen

Einen Hinweis darauf erbrachte zum Beispiel eine britisch-deutsche Studie aus dem Jahr 2015, für die Daten aus verschiedenen Bereichen des Nordatlantiks ausgewertet wurden – vom subpolaren bis zum subtropischen Bereich. „Wir haben herausgefunden, dass bei steigender Temperatur die Remineralisierung schneller vorstättet“, erläutert der Geomar-Wissenschaftler und Co-Autor der Studie Eric Achterberg. Dadurch werde die Eindringtiefe des organischen Materials und somit der Transfer von Kohlenstoff in den tiefen Ozean reduziert. „Das setzt letztendlich die CO<sub>2</sub>-Aufnahme des Ozeans herab.“ Die Abhängigkeit des biologischen Kohlendioxid-Puffers von der Temperatur sei auf jeden Fall kein gutes Zeichen, so Achterberg weiter. Wenn künftig weniger CO<sub>2</sub> vom Ozean aufgenommen werde, verbleibe mehr davon in der Atmosphäre, und die Erwärmung gehe schneller.

Wie genau sich die biologische Pumpe in Zukunft verändern wird, ist allerdings noch unsicher. „Wir kennen eine Vielzahl von Mechanismen, die die biologische Pumpe verändern, beginnen aber gerade erst, deren ineinanderwirken zu verstehen“, sagt Geomar-Professor Andreas Oschlies. Bisher habe man keinen Hinweis auf signifikante Änderungen der marinen Kohlenstoffaufnahme über den biologischen Weg. „Aber wir wissen, dass die atmosphärischen CO<sub>2</sub>-Konzentrationen ohne eine funktionierende marine Biologie etwa doppelt so hoch wären. Die marinen Ökosysteme zu schützen hat also auch eine direkte Klimarelevanz.“

Kohlendioxid ist nützlich – was vor Jahren noch als Slogan von Klimaskleptikern galt, ist mittlerweile ein Geschäftsmodell. Für die Ehrung als „Beste CO<sub>2</sub>-Nutzung“ nominierten der Leverkusener Kunststoffhersteller Covestro und das Nova-Institut in Hürth in diesem Jahr etwa sechs Projekte. Darunter sind bekannte Technologien wie synthetische Kraftstoffe aus CO<sub>2</sub> und Luft, der Einbau von CO<sub>2</sub> in Chemikalien und Kunststoffe, aber auch eine Armbanduhr mit angeblich CO<sub>2</sub>-speicherndem Betonzifferblatt sowie der „Air Vodka“.

Ein US-Unternehmen preist die Spirituose als ersten kohlenstoffnegativen Alkohol der Welt an. Dieser Wodka wird nicht wie üblich aus Getreide gewonnen, sondern aus Kohlendioxid, Wasser und Ökostrom. Solange der „Air Vodka“ in der Flasche bleibt, ist das CO<sub>2</sub> in dem Getränk gespeichert. Das Problem beginnt, wenn der Wodka getrunken wird, der Organismus den Alkohol über mehrere Stufen wieder in Wasser und Kohlendioxid umwandelt und beides irgendwann ausscheidet. Der „Air Vodka“ ist damit von der CO<sub>2</sub>-Bilanz her höchstens ein Nullsummenspiel.

Das Problem, dass das Klimagas nicht lange eingeschlossen bleibt, besteht bei den meisten Arten von CO<sub>2</sub>-Nutzung. Die Klimawissenschaftlerin Sabine Fuss

vom Mercator Research Institute on Global Commons and Climate Change in Berlin sieht denn auch den Boom beim Nutzen von CO<sub>2</sub> kritisch. Zum einen sei das meist mit einem hohen Energieaufwand verbunden – und derzeit sei die Energieversorgung noch lange nicht CO<sub>2</sub>-frei. Zum anderen werde das CO<sub>2</sub> meist recht schnell wieder freigesetzt, wie bei den synthetischen Brennstoffen.

Fuss und andere Klimaforscher raten deshalb in einem unlängst in der Zeitschrift „Nature“ erschienenen Beitrag davon ab, das Nutzen von CO<sub>2</sub> politisch zu fördern. Stattdessen solle man sich auf die Vermeidung von CO<sub>2</sub> konzentrieren – oder auf die Speicherung.

### Für Millionen Jahre gelagert

Im Unterschied zur Nutzung kann die geologische Lagerung von CO<sub>2</sub> – derzeit am besten unter der Abkürzung CCS als Verpressung in unterirdischen Speichern bekannt – nach Ansicht von Fuss das CO<sub>2</sub> tatsächlich über sehr lange Zeit „wegsperrn“. „In der Geologie ist ‚sehr lange‘ wirklich lange“, sagt Fuss. „Natürliche Erdgasvorkommen zeigen, dass Gase für Millionen Jahre geologisch eingeschlossen werden können.“

Am weitesten gediehen ist die Idee, CO<sub>2</sub> in inzwischen leergeforderten Erdgasfeldern unter der Nordsee einzulagern. Technisch

ist das schon erprobt: Die Norweger speichern seit fast 25 Jahren im Sleipner-Feld CO<sub>2</sub> – momentan eine Million Tonnen pro Jahr. Mitte der 2020er Jahre wollen die Niederländer mit einem ähnlichen Projekt nachziehen.

Bislang gibt es allerdings nur wenige Berechnungen dazu, wie sich der Aufwand für solche Vorhaben zum Nutzen für das Klima verhält, wie Sabine Fuss sagt. „Generell kann davon ausgegangen werden, dass die eingelagerten Mengen an CO<sub>2</sub> immer noch groß genug sind, um den Aufwand zu rechtfertigen.“

Für die Wissenschaftlerinnen deuten die Szenarien für die fortschreitende Erderwärmung des Weltklimarats darauf hin, dass es „ohne substanzielle CO<sub>2</sub>-Entnahmen“ nicht möglich sein wird, anspruchsvolle Klimaziele zu erreichen. Zusammen mit ihren Mitautoren listet Fuss in der „Nature“-Publikation zehn Möglichkeiten auf, wie Kohlendioxid genutzt und der Atmosphäre entzogen werden könnte. Jede Methode könnte dabei jährlich bis zu 500 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub> nutzen.

Derzeit werden allerdings rund 37 Milliarden Tonnen CO<sub>2</sub> pro Jahr ausgestoßen. Mit dem Nutzen von CO<sub>2</sub> lässt sich also das Klimaproblem nicht lösen. Nicht zuletzt befinden sich die meisten Technologien noch in der Testphase. Bis sie in großem Maße CO<sub>2</sub> einsparen können, werden noch einige Jahre vergehen.

### Leser fragen

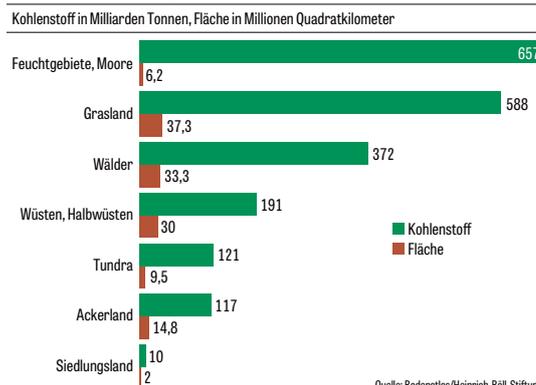
„Wäre eine dezentrale Energiewirtschaft mit kleinen Windrädern nicht vorteilhafter?“

Joachim Wille antwortet:

Der Ausbau der Windenergie ist umstritten, laut Umfragen in der Bevölkerung allerdings weniger, als etwa in Medien oder sozialen Netzwerken vielfach der Anschein erweckt wird. In einer Umfrage Ende 2019 meinten 82 Prozent, er sei wichtig oder sehr wichtig; auch 78 Prozent der Befragten, in deren Wohnumfeld Windkraft-Anlagen stehen, sind mit diesen einverstanden. Die 30 000 Anlagen in Deutschland liefern bereits rund ein Viertel des Strombedarfs. Trotzdem ist nicht von der Hand zu weisen, dass die riesigen Windräder mit mehreren Megawatt Leistung und bis zu 180 Metern Nabenhöhe auch Beeinträchtigungen mit sich bringen können – in Bezug auf Landschaftsbild, Geräusche und Gefährdung für den Vogelflug. Kleine Windräder sind in Deutschland demgegenüber noch eine Nische. Da es keine Meldepflicht gibt, ist unklar, wie viele dieser Anlagen es in Deutschland gibt – Schätzungen liegen zwischen 4000 und 20 000 Stück. Von Kleinwindkraft spricht man bei Nabenhöhen von maximal 50 Metern und einer Leistung bis zu 100 Kilowatt (kW), teils auch bis 750 kW. Typische Betreiber sind Gewerbetreibende und Landwirte. Auch die Verfechter der Kleinwindkraft sehen diese eher als „ergänzende erneuerbare Energie“, nicht als Ersatz für große Anlagen, und dann vor allem in Verbindung mit Photovoltaik-Anlagen und Batteriespeichern. Kleinwindkraft sei geeignet, Zeiten auszugleichen, in denen aufgrund von geringer oder fehlender Sonneneinstrahlung nur wenig Solarstrom erzeugt wird, heißt es beim Bundesverband Kleinwindanlagen. „Der strategische Vorteil ist sauberer Strom im Herbst und Winter.“ Günstig ist, dass der Strom in gekoppelten Systemen in der Nähe verbraucht wird, die Dezentralität damit gestärkt wird. Die Notwendigkeit großräumiger Stromtransporte würde bei größerer Verbreitung sinken. In Städten etwa sind dem Bau von Kleinwindanlagen freilich enge Grenzen gesetzt. Windräder auf Dächern können zudem unangenehme Geräusche verursachen. Trotzdem gibt es auch hier Potenziale, wie etwa eine wissenschaftliche Studie für Berlin aus dem Jahr 2013 gezeigt hat.

Diese Frage stellte Stephan Bröcher aus Amöneburg

### So viel Kohlenstoff speichern die Ökosysteme der Erde



## KIPPELEMENTE

- 1: Schmelzen des arktischen Meereises, des grönländischen und antarktischen Eisschildes
- 2: Absterben der tropischen Korallenriffe
- 3: Methanfreisetzung durch tauende Permafrost-Gebiete, Methan-Ausgasungen aus den Ozeanen
- 4: Abschwächung des Golfstroms
- 5: Ergrünen der Sahara, Trockenheit im Sahel, Versiegen der Staubquellen
- 6: Störungen des Wetterphänomens El Niño
- 7: Destabilisierung des indischen Monsuns, Verlagerung des westafrikanischen Monsuns
- 8: Austrocknen des Amazonas-Regenwalds, Rückgang der borealen Wälder
- 9: Schwächung der marinen biologischen Kohlenstoffpumpe
- 10: **Verlangsamung der Wellen des Jetstreams**
- 11: Austrocknen des nordamerikanischen Südwestens



Ein vom Borkenkäfer zerstörter Fichtenwald in Niedersachsen: eine Folge der Dürre, die auch durch den schwächeren Jetstream bedingt ist. DPA

## Wenn der Jetstream einrastet

Wegen der Abschwächung des Höhenwindbandes drohen mehr Hitzewellen, Überschwemmungen und Kälteeinbrüche / Von Joachim Wille



### DIE SERIE

Das Klima kann sich abrupt ändern. Wenn bestimmte Kippunkte überschritten werden – wenn etwa der Amazonas-Regenwald austrocknet oder die Permafrostböden tauen –, kann es zu Kettenreaktionen kommen. Die Erderwärmung könnte sich dann unkontrollierbar verstärken. Doch noch können wir bei den meisten Kippelementen verhindern, dass sie ausgelöst werden. Die wichtigsten stellt die FR in dieser Serie vor. Mehr Informationen zur Serie finden Sie auf: [fr.de/kippunkte](http://fr.de/kippunkte)

Der Sommer 2018 hatte es in sich. Rekordhitze und Dürren, aber auch Starkregen und Überschwemmungen waren auf der Nordhalbkugel der Erde zu verzeichnen. In Deutschland wurde ein neuer Jahres-Temperaturrekord aufgestellt, Frankfurt beispielsweise brachte es auf satte 108 „Sommertage“ mit 25 Grad und mehr. Vor allem die extrem lange Trockenheit von Februar bis November machte Mensch und Natur zu schaffen.

Getreide vertrocknete auf den Feldern, Setzlinge in den Wäldern gingen millionenfach ein, die Pegel am Rhein sanken auf den niedrigsten je gemessenen Wert. Hitzewellen gab es auch in Russland und im Westen der USA. In Osteuropa und Japan hingegen kam es zu verheerenden Überschwemmungen.

Als eine Ursache für den „Jahrhundertsommer“ und die anderen Wetterextreme haben Klimaforscher Veränderungen im Jetstream ausgemacht – also jenem Starkwindband auf der Nordhalbkugel, das dort normalerweise die Hoch- und Tiefdruckgebiete von West nach Ost schiebt. Der Jetstream weht in einer Höhe von acht bis zwölf Kilometern über den mittleren Brei-

ten rund um die Erde und erreicht dabei Spitzengeschwindigkeiten von 500 Kilometern pro Stunde. Bei Reisen über den Atlantik zeigt sich seine Kraft: Flüge von Europa nach Amerika dauern üblicherweise länger als in Gegenrichtung.

Der Jetstream, auch Strahlstrom genannt, bildet sich dort, wo die kalten Luftmassen aus der Arktis und die warmen vom Äquator aufeinandertreffen, die West-Ost-Ausrichtung entsteht durch die Erdrotation. Der Strahlstrom bewegt sich dabei allerdings meist nicht ganz geradlinig, sondern in leichten Wellen, er flattert sozusagen.

### Die Wellen des Windbandes kamen 2018 zum Stehen

Im Sommer des Jahres 2018 passierte etwas Besonderes. Die Wellen des Windbandes kamen förmlich zum Stehen anstatt weiterzuwandern, wie normalerweise üblich. Der Jetstream mäanderte zwischen Nord und Süd, und ein Tief über dem Ostatlantik – vor Spanien und der Biskaya – wurde dadurch praktisch „festgesetzt“. Heiße Luftströmungen, die ursprünglich aus Nord-

afrika stammten, wurden so Richtung Frankreich und generell Mitteleuropa gelenkt – und zwar ungewöhnlich lange. Der „Super-sommer“ war die Folge.

Das Jahr 2018 bestätigte damit eine Tendenz, die Klimaforscher bereits seit längerem beobachtet hatten: Der Jetstream schwächt sich immer wieder ab und weht dann seltener auf einem relativ geraden Kurs parallel zum Äquator, stattdessen schlingelt er sich öfter in Riesenwellen über die Nordhalbkugel.

Die in Mitteleuropa vorherrschende Westwindströmung wird häufiger durch stationäre Wetterlagen ersetzt. Verharren die Jetstream-Wellen über Wochen an einer Stelle, kann aus ein paar warmen, sonnigen Tagen eine Hitzewelle oder eine Dürre entstehen, und aus ein paar regnerischen Tagen können Fluten werden.

Eine im vorigen Jahr veröffentlichte Studie des Potsdam-Instituts für Klimafolgenforschung (PIK) belegte diese Zusammenhänge. „Unsere Studie zeigt, dass die spezifischen Orte und der Zeitpunkt der Wetterextreme im Sommer 2018 nicht zufällig waren“, erläuterte Leitautor Kai Kornhuber, der am PIK und an

der Universität Oxford forscht. Sie seien direkt mit einem sich wiederholenden Muster im Jetstream verbunden gewesen – ähnlich wie in früheren Jahren mit extremen Wetterereignissen, so bei den Hitzewellen in Europa in den Jahren 2003, 2006 und 2015.

Häufigkeit und Dauer hätten etwa seit der Jahrhundertwende zugenommen, so die Experten. „In den zwei Jahrzehnten vor 1999 gab es keine Sommer, in denen wir dieses Muster der stockenden Wellen über eine Dauer von zwei Wochen oder noch länger hatten“, berichtete Coautor Dim Coumou vom PIK und der Freien Universität Amsterdam. Seither habe es hingegen bereits sieben solcher Sommer gegeben.

Unterstützt wird diese Analyse auch von Wissenschaftlern des Alfred-Wegener-Instituts für Polar- und Meeresforschung (AWI). Ihnen gelang es in ihrem globalen Klimamodell, einen Zusammenhang zwischen dem „Schlingenkurs“ des gebremsten Jetstreams und der globalen Erwärmung herzustellen.

Als eine Ursache dafür identifizierten sie das Schrumpfen des arktischen Meereises und die daran gekoppelte besonders starke

## Klimakippelement einrastender Jetstream



Erwärmung der nördlichsten Region der Erde – sie verläuft etwa doppelt so schnell wie im globalen Durchschnitt auf dem Planeten. Dadurch werden vor allem im Sommer die Temperaturunterschiede zwischen Arktis und Äquator immer geringer, was zur Folge hat, dass der Antrieb für den Jetstream schwächer wird. „Sollte die Eisdecke weiter schrumpfen, gehen wir davon aus, dass die bisher beobachteten Extremwetterereignisse in den mittleren Breiten in ihrer Häufigkeit und Intensität zunehmen werden“, sagte AWI-Professor Markus Rex. Und daran, dass das Eis tendenziell weiter schmilzt, gibt es keine Zweifel.

### Risiko besonders für Europa und Nordamerika

Auch die PIK-Forscher erwarten, dass der Jetstream in Zukunft noch häufiger einrasten wird – unter anderem auch, weil sich die Landmassen auf der Erde schneller erwärmen als die Meeresgebiete. Der erhöhte Temperaturkontrast begünstigt das Entstehen des stagnierenden Wellenmusters, das zu den Hitzewellen führte. „Ein weiterer relevanter Faktor könnte sein, dass der nördliche Atlantik sich abgekühlt hat, wahrscheinlich als Folge der Verlangsamung der Atlantischen Meridionalen Umwälzzirkulation, besser bekannt als Golfstrom“, erläuterte PIK-Professor Stefan Rahmstorf.

Die Experten halten die Entwicklung beim Jetstream für besonders gefährlich, weil die anhaltenden Hitzewellen zum allgemeinen Temperaturanstieg durch die globale Erwärmung noch hinzukommen. Das erhöhe das Risiko besonders extremer Hitzewellen, vor allem in Regionen wie Europa und Nordamerika, warnen sie.

Allerdings kann der wellenförmige Verlauf des Strahlstroms im Winter dort auch gegenteilige Folgen haben – er kann zu ungewöhnlich starken Kälteeinbrüchen führen, so wie in den USA und Kanada Anfang 2019. Ein schwacher Jetstream mit besonders großen Wellen hatte damals für die eisige Polarluft ein Einfallstor nach Süden geöffnet. US-Präsident Donald Trump lag deswegen mit seiner Twitter-Intervention zu der Frostattacke voll daneben: „Was zum Teufel ist mit der Erderwärmung los? Bitte komm schnell zurück, wir brauchen dich.“

## Notwendigkeit mit Fragezeichen

Einige Methoden, um der Atmosphäre CO<sub>2</sub> zu entziehen, sind umstritten

VON CHRISTIAN MIHATSCH

Es ist gerade noch möglich, die Klimaerwärmung auf 1,5 Grad zu begrenzen, wie das Pariser Klimaabkommen verlangt. Das zeigte im vorigen Jahr ein Bericht des Weltklimarats IPCC. Nahezu alle Wege, die der IPCC als gangbar ermittelt hat, erfordern aber neben einer schnellen Reduktion des Treibhausgas-Ausstoßes auch „negative Emissionen“. Das bedeutet: Der Atmosphäre muss CO<sub>2</sub> entzogen werden.

Am einfachsten sind das Wiederaufforsten gerodeter Wälder, das Wiedervernässen trockengelegter Feuchtgebiete und das Wiederherstellen von Mangrovenwäldern und Seegraswiesen. All diese Möglichkeiten haben zusätzlich einen Nutzen für die Artenvielfalt. Bestehende Wälder können außerdem mehr CO<sub>2</sub> speichern, wenn Raubtiere wieder angesiedelt werden, die dann die Pflanzenfresser in Schach halten.

CO<sub>2</sub> ließe sich schließlich auch in Gebäuden binden, indem man mit Holz baut oder auch mit Bambus. Das würde zusätzlich den Verbrauch von Beton reduzieren. Auch Vorschläge gegen die Verschwendung von Energie, Rohstoffen und Lebensmitteln warten auf ihre Umsetzung. Nicht zuletzt gibt es einige unerwartete Möglichkeiten mit großem Potenzial, etwa bessere Bildung in Ent-

wicklungsländern, besonders für Mädchen, und Zugang zu Verhütungsmitteln – Stichwort: Bremsen des Bevölkerungswachstums.

Zusätzlich setzt der IPCC auf eine Technik namens BECCS. Das Kürzel steht für „Bio-Energie mit CCS“. Dabei wird pflanzliches Material wie Holz verbrannt und Bioenergie erzeugt. Anschließend wird aus dem Abgas das CO<sub>2</sub> herausgefiltert und in tiefe Gesteinsformationen verpresst – wie beim CCS für Kohlekraftwerke („Carbon Capture and Storage“, auf Deutsch: CO<sub>2</sub>-Abscheidung und -Speicherung). So wird das CO<sub>2</sub>, das die Pflanzen beim Wachstum aufgenommen haben, dauerhaft der Atmosphäre entzogen.

### Bisher fehlt die Infrastruktur

Die Notwendigkeit für BECCS ist je nach IPCC-Pfad unterschiedlich. Im Extremfall müssen damit aber jährlich negative Emissionen in Höhe von neun Milliarden Tonnen im Jahr 2050 und 16 Milliarden Tonnen im Jahr 2100 erzielt werden. Dazu wäre eine riesige CCS-Infrastruktur erforderlich, und an Land oder im Meer müssten große Mengen an Energiepflanzen produziert werden.

Ohne all das kommt eine andere Methode für negative Emissionen aus, die in die Kategorie Geoengineering fällt: die Verwitterung von Gestein. Auch dabei

wird CO<sub>2</sub> gebunden. Der Prozess lässt sich beschleunigen, indem man Gestein zu Pulver zermahlt und dann Regen aussetzt.

Anschließend kann man das Gesteinsmehl auf Äckern als Minereraldünger ausbringen oder ins Meer schütten, wo es auch bei natürlicher Verwitterung gelandet wäre. Dort wirkt der Gesteinstaub zudem der Versauerung der Ozeane entgegen. Eine Studie warnt allerdings: Der Nutzen müsse „abgewogen werden mit den Kosten und der Umweltwirkung des Abbaus riesiger Mengen an alkalischem Material (wie Kalk) und deren globaler Verteilung“. Eine weitere Geoengineering-Methode ist die Meeresdüngung etwa mit Eisenspänen. Dadurch wird das Algenwachstum angeregt. Wenn diese dann absterben und zu Boden sinken, ist ebenfalls CO<sub>2</sub> gebunden. Auch hier warnen Umweltschützer vor den Nebenwirkungen.

Weder Pflanzen noch Gestein braucht schließlich eine dritte Methode: das Herausfiltern von CO<sub>2</sub> aus der Luft und die anschließende Entsorgung mittels CCS. Doch ohne Input kommt auch diese Methode nicht aus. Die „Direct Air Capture“ (DAC) genannte Technik benötigt Strom. Folglich ist DAC nur sinnvoll, wenn genug Strom aus erneuerbaren Quellen zur Verfügung steht.

### Leser fragen

## Wie kommt der Ausbau der Geothermie voran?

Joachim Wille antwortet:

Theoretisch könnte die Energie aus der Tiefe der Erde alle Energieprobleme lösen. Aus dem Innern des Planeten steigt ein ständiger Strom von Wärme an die Oberfläche. Rund 30 Prozent dieser Energie stammen aus dem 5000 bis 7000 Grad Celsius heißen Erdkern, rund 70 Prozent entstehen durch den Zerfall radioaktiver Elemente in Erdmantel und Erdkruste. Angezapft wird die Erdwärme bisher zumeist zum Beheizen und Kühlen von Häusern oder technischen Anlagen. Zum Großteil geschieht das einerseits oberflächennah – in bis zu 400 Metern Tiefe – mit Erdkollektoren, Erdwärmesonden oder Energiepfählen; und andererseits per Tiefen-Geothermie, bei der man wasserführende Schichten in 1000 bis 4500 Metern Tiefe nutzt, die durch Bohrungen 40 bis 150 Grad heißes Wasser liefern und Nah- oder Fernwärmenetze speisen. In Deutschland gibt es bereits rund 400 000 Anlagen zum Beheizen von Häusern. Hinderlich für den Ausbau sind die hohen Investitionskosten von 10 000 bis 15 000 Euro pro Haus und der relativ teure Strom für den Betrieb der Wärmepumpe. Außerdem steht die Erdwärme im Wettbewerb mit Gasheizungen, für die der Brennstoff derzeit sehr günstig ist. Anlagen zur Wärmeversorgung laufen im Voralpenland, im Oberrheingraben oder in der norddeutschen Tiefebene teilweise schon seit Jahrzehnten. Zur Stromgewinnung wird Erdwärme hingegen nur wenig genutzt. Den Startschuss gab im Jahr 2000 das Erneuerbare-Energien-Gesetz, das die Strom-Geothermie erstmals per Einspeisevergütung förderte. Insgesamt laufen in Deutschland heute 37 Anlagen der Tiefen-Geothermie, darunter neun, die (auch) Strom produzieren. Drei Anlagen sind im Bau, 30 weitere geplant. Geothermie spielt in den meisten Szenarien für eine vollständige Umstellung auf erneuerbare Energien im Stromsektor allerdings nur eine kleine Rolle. Das liegt daran, dass sie wegen der hohen Kosten für die Tiefbohrungen vergleichsweise teuer bleibt, während die Kosten für Wind- und Sonnenenergie weiter stark sinken.

Diese Frage stellte André Wolf als Blogkommentar.

### Weltweite Leistung von Geothermieanlagen 2018

Ausgewählte Länder, in Megawatt	
USA	2546
Indonesien	1946
Philippinen	1928
Türkei	1283
Neuseeland	996
Mexiko	951
Italien	767
Island	753
Kenia	663
Japan	536
Deutschland	32

Quelle: Internationale Organisation für erneuerbare Energien

## KIPPELEMENTE

- 1: Schmelzen des arktischen Meereises, des grönländischen und des antarktischen Eisschildes
- 2: Absterben der tropischen Korallenriffe
- 3: Methanfreisetzung durch tauende Permafrostgebiete
- 4: Abschwächung des Golfstroms
- 5: Ergrünen der südlichen Sahara, Verlagerung des westafrikanischen Monsuns
- 6: Störungen des Wetterphänomens El Niño
- 7: Destabilisierung des indischen Monsuns
- 8: Austrocknen des Amazonas-Regenwalds, Rückgang der borealen Wälder
- 9: Abschwächung der marinen „Kohlenstoffpumpe“
- 10: Verlangsamung oder Einrasten der Wellen des Jetstreams
- 11: **Austrocknen des nordamerikanischen Südwestens**
- 12: Abschluss der Serie: Interview mit Hans Joachim Schellnhuber, dem früheren Direktor des Potsdam-Instituts für Klimafolgenforschung



Ende 2019 bei Santa Barbara, Kalifornien: Forscher sagen, die Waldbrandsaison in den USA dauere heute drei Monate länger als noch 1970. AFP

## „Golden State“ auf dem Trockenen



## DIE SERIE

Das Klima kann sich abrupt ändern. Wenn bestimmte Kippunkte überschritten werden – wenn etwa der Amazonas-Regenwald austrocknet oder die Permafrostböden tauen –, kann es zu Kettenreaktionen kommen. Die Erderwärmung könnte sich dann unkontrollierbar verstärken. Doch noch können wir bei den meisten Kippelementen verhindern, dass sie ausgelöst werden. Die wichtigsten stellt die FR in dieser Serie vor. Mehr Informationen zur Serie finden Sie auf: [fr.de/kippunkte](http://fr.de/kippunkte)

Der Südwesten der USA könnte in Zukunft mit noch größeren Dürren zu kämpfen haben

Von Joachim Wille

Kalifornien gilt als „Golden State“ – mit Sonne, Sand und Surfern. Der drittgrößte Bundesstaat der USA nach Texas und Alaska ist immer noch ein Sehnsuchtsziel für viele. Metropolen wie San Francisco und Los Angeles, ein fruchtbares Längstal, das Central Valley, in dem Obst, Gemüse und Wein auch für den Rest der USA angebaut werden, alpine Berge, grandiose Küsten, heiße Wüsten – all das findet man hier. Die Ökonomie ist stark, wäre Kalifornien mit seinen 40 Millionen Einwohnern ein eigener Staat, würde er als fünftgrößte Volkswirtschaft der Welt firmieren.

Doch Kalifornien und die anderen Staaten im Südwesten der USA wie Arizona, Nevada und New Mexico könnten vom Klimawandel besonders stark getroffen werden. Die Niederschlagsmengen nehmen dort schon heute ab, da sich die subtropische Trockenzone aufgrund der globalen Erwärmung weiter nach Norden ausdehnt. Hinzu kommt, dass die Region sich überdurchschnittlich schnell erwärmt. Die mittlere Temperatur liegt in Südkalifornien

laut der US-Umweltbehörde EPA heute bereits rund drei Grad höher als in vorindustrieller Zeit, während die Landmassen der Erde sich im Durchschnitt um 1,5 Grad erwärmt haben. Diskutiert wird in der Klimaforschung sogar, ob ein Kippunkt existiert, bei dessen Überschreiten der Südwesten der USA schlagartig mit noch größerer Trockenheit zu kämpfen hätte.

### Die schlimmsten Brände waren die der letzten Jahre

In der Geschichte Kaliforniens gab es immer wieder lange Trockenperioden, wie Wissenschaftler anhand der Analyse von Baumringen herausfanden, die ein natürliches Klimaarchiv darstellen. Während des sogenannten mittelalterlichen Klimaoptimums – vermutlich ausgelöst durch Änderungen in ozeanisch-atmosphärischen Zirkulationssystemen – gab es dort im zwölften Jahrhundert sogar 40 Jahre lang kaum Regen. In den vergangenen 50 Jahren kam es zu starken Dür-

ren 1977, 1986 bis 1991, 2001/2002 und 2011 bis 2016. Tatsächlich war die letzte dieser Perioden die trockenste seit Beginn der Wetteraufzeichnungen im Jahr 1895. Allerdings kann es zwischen solchen Perioden durchaus auch zu intensiven Niederschlägen kommen, wie 2017, als Kalifornien das Jahr mit den zweithöchsten Regenmengen seit Beginn der Aufzeichnungen erlebte.

Die Folgen der jüngsten Dürreperiode waren gravierend: Wälder brannten großflächig ab, der Grundwasserspiegel unter den bewässerten Feldern sank dramatisch, Tiere verendeten. Der damalige Gouverneur von Kalifornien, Jerry Brown, rief 2014 den Dürrenotstand aus, 2015 ordnete er eine drastische Einschränkung der Wassernutzung für die Landwirtschaft an.

Eine Folge der unter dem Strich zunehmenden Trockenheit und der Erwärmung ist die Zunahme der Waldbrände, die auch nach dem Ende der langen Dürreperiode 2018 und 2019 in Kalifornien wüteten. Betroffen war dabei auch das Hinterland der Millio-

nenstädte Los Angeles und San Francisco. Bis zu 200 000 Menschen mussten ihre Häuser verlassen, es gab mehr als 100 Tote, und in der Weinbauregion Sonoma zerstörten die Flammen eine Fläche von 30 000 Hektar, größer als das Stadtgebiet von München.

An und für sich sind Waldbrände für den Staat an der Westküste nichts Außergewöhnliches. Allerdings fällt auf, dass sich 15 der 20 zerstörerischsten Brände in seiner Geschichte seit dem Jahr 2000 ereigneten. Experten gehen davon aus, dass die Feuer durch die Klimaerwärmung eine neue Stufe erreicht haben. In den letzten Jahrzehnten hat sich die Lage eindeutig verschärft. Die Waldbrandsaison dauert in den gesamten USA heute fast drei Monate länger als noch vor einem halben Jahrhundert, und in Kalifornien finden die Feuer in den Wald- und Buschregionen praktisch ganzjährig statt. Zudem sind die betroffenen Gebiete größer.

Man könne dem Klimawandel zwar nicht die Schuld am Ausbruch von Landschaftsbränden geben, meinte dazu der Feuerex-

## Klimakippelement Nordamerikanischer Südwesten



## Eine Prämie für weniger Menschen?

Nicht das Bevölkerungswachstum, sondern der Lebensstil in den Industrie- und Schwellenländern ist der Hauptgrund für die Klimakrise

VON VERENA KERN

perte Lindon Pronto vom „Global Fire Monitoring Center“ in Freiburg, einer Außenstelle des dortigen Max-Planck-Instituts für Chemie. Tatsächlich sind Blitze, Brandstiftung oder technische Fehler in der Infrastruktur, etwa defekte Stromleitungen, die Ursachen. „Aber der Klimawandel ist verantwortlich für das vermehrte Auftreten von Wetterextremen wie anhaltenden Trockenzeiten, die wiederum die Schwere und das Verhalten eines Brandes beeinflussen“, sagte er dem Online-Magazin „klimareporter.de“. Die Hitze lasse die Landschaft stark austrocknen. Die Kombination von hohen Temperaturen, niedriger Luftfeuchtigkeit und starken Winden könne dann „explosive Situationen“ verursachen.

Forscher erwarten zudem, dass der Klimawandel eine Verschiebung der Haupt-Waldbrand-saison vom Herbst in den Winter begünstigt – und sie befürchten, die Feuer könnten wegen der in dieser Jahreszeit noch trockeneren Vegetation dann länger dauern.

### Der Region könnte das Wasser ausgehen

Doch manche Klimaexperten schließen auch noch weit gravierendere Veränderungen nicht aus. Klimamodelle sagen für den Südwesten der USA eine verstärkte Trockenheit, verringerten Schneefall in den Bergen, ein früheres Abschmelzen dieser „Wasserreserven“ und damit stärkere Wasserknappheit durch schwächer gespeiste Flüsse – etwa den Colorado River – voraus. Die Zahl der Tage mit extremer Hitzebelastung wird danach bis 2100 stark zunehmen.

Auch das Risiko für mehr und längere Trockenheitsperioden steige, gravierend allerdings erst in der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts. Dürren könnten dann nach Klimamodellen bis zu zwölf Jahre und länger dauern, wie eine Studie von Wissenschaftlern um Professor Daniel Cayan ergab, der an der Universität von Kalifornien in San Diego lehrt. Dass die ungewöhnlich lange Trockenperiode im letzten Jahrzehnt bereits der Beginn einer jahrzehntelangen Megadürre sein könnte, ist allerdings noch Spekulation. In jedem Fall gilt aber: Tritt ein solches Ereignis ein – der „Golden State“ würde sein Prädikat „Golden“ verlieren.

Rund 7,8 Milliarden Menschen leben derzeit auf der Erde. Bis 2050 werden es nach UN-Prognosen 9,7 Milliarden sein, bis 2100 sogar 10,9 Milliarden. Sie alle brauchen Nahrung und ein Dach über dem Kopf, sie alle verbrauchen Energie. Doch schon heute überlastet die Menschheit den Planeten, mit einem viel zu hohen Ressourcenverbrauch, zu viel Abholzung, einem viel zu hohen Ausstoß an Treibhausgasen. Sind wir längst zu viele?

Seit Jahren steht die Frage im Raum, ob die steigende Zahl von Menschen mit den planetaren Grenzen der Erde vereinbar ist. Kann man mehr als zehn Milliarden versorgen und gleichzeitig die Pariser Klimaziele einhalten? Oder werden so alle Bemühungen um Klimaschutz konterkariert wie in einer Art Rebound-Effekt? Wäre es nicht besser, das Bevölkerungswachstum zu begrenzen?

Die Frage ist schwierig, weil sie sich hart an der Grenze zum ethisch Fragwürdigen bewegt. Man kann niemandem verbieten, Kinder zu bekommen. Und wer sollte denn darüber entscheiden, wann es zu viel ist? Und: wer zu viel ist? In jedem Fall wäre es eine Anmaßung, Es würde den Werten zuwiderlaufen, zu denen sich die UN-Staaten bekannt haben. Jedes Leben zählt. Das ist der Grundsatz, wie sich in der Corona-Krise gerade erfreulicherweise zeigt.

Wie heikel das Thema ist, erwies bereits 2017 eine schwedische Studie. Die Forschenden hatten behauptet, der Verzicht auf ein Kind bringe mit Abstand am meisten fürs Klima, und so für heftige Diskussionen gesorgt. Allerdings waren ihre Berechnungen wenig plausibel. Sie hatten jeweils die Emissionen der weiteren Nachkommen mit aufgeschlagen und waren so zu astronomischen CO<sub>2</sub>-Werten gekommen. Ein Jahr zuvor hatte ein Club-of-Rome-Bericht empfohlen, jeder Frau zu ihrem 50. Geburtstag eine Prämie von 80 000 Dollar zu zahlen, wenn sie maximal ein Kind bekommen hat. Allerdings nur den Frauen in den reichen Ländern, da dort der ökologische Fußabdruck um ein Vielfaches höher ist als in armen Ländern. Auch hier folgte eine aufgeheizte Debatte.

### Die Geburtenraten sinken

Dabei zeigen die Zahlen, dass es eigentlich gar keinen Grund gibt, das Bevölkerungswachstum als das gravierendste Problem der Menschheit anzusehen. Schon seit rund 20 Jahren flacht die Kurve deutlich ab. Die Menschheit wächst viel langsamer. Dass jemals eine Zahl von weit über zehn Milliarden erreicht wird, ist unwahrscheinlich. Die Geburtenrate liegt nur noch bei durchschnittlich 2,5 Kindern pro Frau, bis 2050 rechnen die UN mit 2,2 Kindern. 1990 waren es noch 3,2.

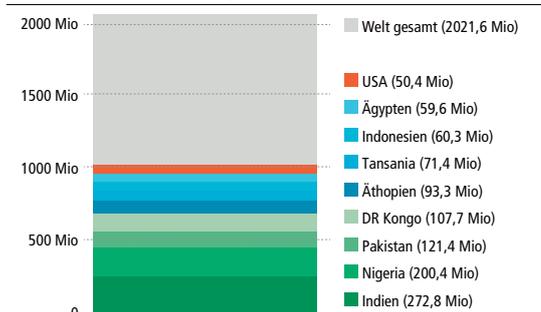
Zugleich ist die durchschnittliche Lebenserwartung deutlich gestiegen. Nach UN-Zahlen lag sie 1990 bei 64,2 Jahren, heute sind es 72,6 Jahre. Bis 2050 könnten es 77,1 Jahre sein. Es wäre absurd, dies als unerwünschte Entwicklung anzusehen. Aber es trägt dazu bei, dass die Zahl der Menschen wächst, die auf der Erde leben.

Insgesamt hat sich die Weltbevölkerung in den letzten 100 Jahren vervierfacht. Der CO<sub>2</sub>-Ausstoß der Menschheit hat sich im selben Zeitraum aber verzehnfacht. Mehr Menschen sind also nicht der Hauptgrund für den Anstieg der Emissionen, wie schon der Weltklimarat IPCC in seinem Sachstandsbericht 2013 klargestellt hat. Der Hauptgrund ist der extrem ressourcen- und energieintensive Lebensstil der Menschen in den reichen Ländern. Die 20 größten Industrie- und Schwellenländer produzieren immer noch rund 80 Prozent der weltweiten CO<sub>2</sub>-Emissionen.

Die Forschung ist sich einig, dass Bildung, Geschlechtergerechtigkeit, Gesundheit und Familienplanung wichtig sind, um die weltweite Bevölkerungszahl zu stabilisieren. Frauen, die selber über Verhütung und Lebensgestaltung entscheiden können, haben in der Regel weniger Kinder. Noch wichtiger ist aber, dass sich die Art und Weise ändert, wie in den Ländern gelebt und produziert wird, die den größten Anteil am Treibhausgasausstoß haben.

### Voraussichtliche Zunahme der Weltbevölkerung bis 2050

Die Hälfte des Wachstums bis 2050 geht auf neun Länder zurück



Quelle: Deutsche Stiftung Weltbevölkerung/Vereinte Nationen

### Leser fragen

## Reicht das Grundgesetz nicht, um die Politik zu Klimaschutz zu verpflichten?

Joachim Wille antwortet:

Der Schutz der Umwelt steht als Staatsziel im Grundgesetz im Paragrafen 20a. Wortlaut: „Der Staat schützt auch in Verantwortung für die künftigen Generationen die natürlichen Lebensgrundlagen und die Tiere im Rahmen der verfassungsmäßigen Ordnung durch die Gesetzgebung und nach Maßgabe von Gesetz und Recht durch die vollziehende Gewalt und die Rechtsprechung.“ § 20a wurde 1994 nach langer Debatte neu ins 1949 verabschiedete Grundgesetz aufgenommen. Auslöser der Diskussion war 1986 die Atomkatastrophe von Tschernobyl. Der Schutz der Umwelt hat damit aber nicht den Rang eines Grundrechtes bekommen, wie Grüne und SPD gefordert hatten. Kommentatoren wie der damalige Verfassungsrichter Konrad Hesse urteilten denn auch, die Staatsziele bänden die staatlichen Organe zwar, ließen ihnen „jedoch hinsichtlich des Zeitpunktes und der Mittel der Realisierung weitgehende Freiheiten“. Kein Wunder daher: Die Hoffnung, das Staatsziel Umwelt werde Regierungen und Parlamente automatisch in die richtige Spur bringen, hat getrogen. Es handelt sich nicht um ein individuell einklagbares Recht. Im Kampf etwa gegen Straßenbau oder für Naturschutz half das Staatsziel praktisch nichts, auch bei Entscheidungen des Bundesverfassungsgerichtes spielte es bis heute nur selten eine Rolle, und dann auch nur als zusätzlicher Erwägungsgrund, etwa bei Entscheidungen zu Atomausstieg oder Gentechnik. Das Ganze zeigt: Ein so allgemein formuliertes Staatsziel reicht nicht aus, um unsere Politiker auf die Durchsetzung von Natur-, Umwelt- und Klimaschutz festzulegen. Fragt sich, ob der Klimaschutz profitieren würde, wenn er als eigenes Staatsziel ins Grundgesetz käme, wie es die Grünen vorgeschlagen haben. Der Umweltjurist Felix Eckardt hingegen meint: „Ein Staatsziel Klimaschutz ist witzlos, weil Staatsziele den Staat zu fast nichts verpflichten.“ Er präferiert eine andere Schiene: Es gebe bereits heute einklagbare Klimaschutzverpflichtungen aus den Grundrechten auf Leben, Gesundheit, Existenzminimum und Eigentum im deutschen und europäischen Verfassungsrecht. Tatsächlich konnten Umweltschützer damit 2019 in den Niederlanden einen historischen Erfolg erzielen: Das Oberste Gericht in Den Haag verpflichtete die Regierung, die CO<sub>2</sub>-Emissionen schneller als geplant zu senken. In Deutschland scheiterte eine ähnliche Klage.

Diese Frage stellte Jürgen H. Winter aus Schöneck.



## DIE SERIE

Das Klima kann sich abrupt ändern. Wenn bestimmte Kippunkte überschritten werden – wenn etwa der Amazonas-Regenwald austrocknet oder die Permafrostböden tauen –, kann es zu Kettenreaktionen kommen. Die Erderwärmung könnte sich dann unkontrollierbar verstärken. Doch noch können wir bei den meisten Kippelementen verhindern, dass sie ausgelöst werden. Wie das funktionieren kann, hat die FR in der Serie „Klima auf der Kippe“ vorgestellt, die heute mit einem ausführlichen Interview mit dem Gründer des Potsdam-Instituts für Klimafolgenforschung (PIK), Hans Joachim Schellnhuber, endet.

## Die bisherigen Beiträge waren:

- 1: Schmelzen des arktischen Meereises, des grönländischen und des antarktischen Eisschildes
- 2: Absterben der tropischen Korallenriffe
- 3: Methanfreisetzung durch tauende Permafrostgebiete
- 4: Abschwächung des Golfstroms
- 5: Ergrünen der südlichen Sahara, Verlagerung des westafrikanischen Monsuns
- 6: Störungen des Wetterphänomens El Niño
- 7: Destabilisierung des indischen Monsuns
- 8: Austrocknen des Amazonas-Regenwalds, Rückgang der borealen Wälder
- 9: Abschwächung der marinen „Kohlenstoffpumpe“
- 10: Verlangsamung oder Einrasten der Wellen des Jetstreams
- 11: Austrocknen des nordamerikanischen Südwestens

Alle Beiträge der FR-Serie gibt es als PDF-Download unter: [fr.de/kippunkte](http://fr.de/kippunkte)



Erst die Koralle, dann der Mensch? – „Wenn wir die Erwärmung bei 1,5 Grad stoppen, kommen wir wohl mit einem blauen Auge davon.“

RTR

## „Wir sind ganz nahe an einem Notfall“

Wissenschaftler Hans Joachim Schellnhuber über die Kippelemente des Klimas, eine drohende „Heißzeit“ – und warum wir trotzdem nicht die Flinte ins Korn werfen sollten

**Professor Schellnhuber. Sie haben zusammen mit Kollegen vor einem „planetaren Notfall“ in Bezug auf das Klima gewarnt. Die Menschheit sei dabei, Kippelemente des Klimasystems umzustossen – mit verheerenden Folgen. Wieso diese dramatische Ansage?**

Stellen Sie sich stark vereinfacht vor, Sie sind Fluglotse in einem Tower. Und bemerken plötzlich: Zwei Jets sind auf Kollisionskurs. Sie haben noch Sekunden, höchstens Minuten, bis zum Crash: Doch es dauert auch eine gewisse Zeit, um die Flugzeuge auf sicheren Kurs zu bringen. Wenn die verbleibende Interventionszeit sich der Reaktionszeit annähert, dann sind Sie dabei, die Kontrolle zu verlieren. Sie können zwar noch reagieren, aber vielleicht reicht es nicht mehr, um die Katastrophe abzuwenden. Dies ist eine akute Notstandssituation. So ähnlich ist es mit den Kippelementen – nur, dass es nicht um Sekunden geht, sondern unser Handeln heute Auswirkungen auf

die nächsten Hunderte von Jahren haben wird.

**Das heißt im Fall Erde konkret?**

Es besteht das Risiko, dass die globale Umwelt bei einer Erderwärmung um vier, fünf oder sechs Grad völlig aus den Fugen gerät und der Planet langfristig sogar in Teilen unbewohnbar wird. Das muss auf jeden Fall verhindert werden. Um die Erderwärmung auf vermutlich noch verkraftbare zwei Grad zu beschränken, bleiben uns noch 30 Jahre Zeit. Um andererseits die globale Wirtschaft zu dekarbonisieren, braucht man, optimistisch betrachtet, 20 Jahre. Das heißt, wir sind ganz nahe an einem Notfall, weil wir Risiken inzwischen zwar erkennen, aber fast keine Eingreifzeit mehr haben, um das Desaster abwenden zu können. Wir befinden uns also in einer hochgefährlichen Krise, weil sich die Lebens- und Entwicklungsbedingungen unserer Zivilisation, wie wir sie heute kennen, fundamental verändern

könnten. Und zwar nicht zum Besseren.

**Sie haben neun Kippelemente des Klimasystems identifiziert, die möglicherweise bereits kurz vor der Destabilisierung stehen. Wo ist es am kritischsten?**

Wir haben derzeit eine globale Erderwärmung von rund 1,1 Grad gegenüber vorindustrieller Zeit. Der westantarktische Eisschild ist wahrscheinlich schon Stückweise gekippt, der Verlust großer Eismassen bereits angestoßen. Die tropischen Korallenriffe werden ab etwa 1,5 Grad absterben. Auch beim Grönland-Eisschild dürfte bei zwei Grad Erderwärmung die Eisschmelze auf breiter Front in Gang kommen. Es gibt überdies Spekulationen, dass der Amazonas-Regenwald bald kippen könnte, weil der lebenserhaltende Wasserkreislauf durch Abholzung und Fragmentierung inzwischen stark gestört ist.

**Welche Kippelemente sind für die Menschheit am gefährlichsten?**

Alle sind gefährlich. Unsere Zivilisation ist ziemlich gut angepasst an die Verhältnisse, die die Menschheit in den rund 11 000 Jahren seit der letzten Eiszeit vorgefunden hat. Jede Veränderung bei den Kippelementen würde einen enormen Anpassungsdruck hervorrufen. Ein Beispiel: Selbst wenn wir es schaffen, die globale Erderwärmung auf zwei Grad zu begrenzen, ist schon jetzt durch die Trägheit des Systems ein Meeresspiegelanstieg initiiert, der bis 2300 bei zwei bis drei Metern liegen und damit viele Küstenzonen unbewohnbar machen könnte. Positive Folgen des Klimawandels kann es in einigen Regionen mitunter auch geben, aber wohl nur temporär. Die allgemeine Erderwärmung kann zwar beispielsweise in Sibirien bessere Bedingungen für die Landwirtschaft bringen. Wenn dann allerdings die Straßen und Gebäude durch das Auftauen des Permafrosts im Schlamm versinken, ist unterm Strich wohl nichts gewonnen.

## Gibt es Möglichkeiten, sich gegen die Folgen der Kippelement-Auslösung zu schützen – etwa beim Meeresspiegelanstieg?

Das kommt darauf an, wie schnell reagiert wird. Es ist eine Bedrohung, bei der wir wissen, wir müssen sofort und kraftvoll handeln. Schmilzt der Grönland-Eisschild komplett ab, steigt der Meeresspiegel langfristig um sieben Meter. Das heißt: Man müsste theoretisch Hunderte Millionen Menschen aus Küstenregionen umsiedeln und von dort auch einen großen Teil der weltweit akkumulierten Sachwerte abziehen. Oder aber die entsprechenden Regionen mit Deichbau und anderen Maßnahmen schützen. Beides wären schier unvorstellbare Aufgaben. Die Frage ist, wird das angepackt? Und wann? Vermutlich wird man sich nach und nach aus den Küstenzonen zurückziehen. Dadurch wird der Raum, in dem die Menschheit heute lebt und Nahrungsmittel anbauen kann, schrumpfen. Verschwindet zum Beispiel das Mekong-Delta, geht dadurch etwa die Hälfte der Nahrungsmittelproduktion in Vietnam verloren. Ich kann derzeit nicht erkennen, dass irgendein Land der Erde die Mittel aufbrächte, um die Probleme zu neutralisieren, die durch das Aktivieren der Kippelemente entstehen würden. Die vernünftigeren – und auch einzig realistische – Chance ist es, das große Kippen weitestgehend zu verhindern, indem wir die globale Erwärmung begrenzen und bei deutlich unter zwei Grad Celsius stabilisieren.

## Welche Beispiele aus der Erdgeschichte können illustrieren, was das Auslösen von Kippelementen bedeutet?

Die Erdgeschichte ist voll von solchen Beispielen. Der Golfstrom wurde, salopp gesprochen, mehrfach an- und ausgeschaltet, es gab Phasen mit massiver Ozeanversauerung und entsprechendem marinen Artensterben, es gab disruptive Veränderungen der Monsun-Systeme. Die Erde war zweimal in ihrer langen Geschichte ein Schneeball, zwischendurch aber auch völlig eisfrei. Der Parallellfall für unsere heutige Situation ist jedoch das planetare Temperaturmaximum im Paläozän-Eozän-Übergang vor 56 Millionen Jahren. Damals kam es zu einer Erwärmung um fünf, sechs, teilweise sogar acht Grad. Die Atmosphäre wurde Tausende bis Zehntausende Jahre lang mit CO<sub>2</sub> und Methan angereichert. Die Folgen waren verheerend, beispielsweise extreme Dürren in den Subtropen. Doch die Situation heute ist eine völlig andere: Wir reden jetzt über einen Klimawandel, der sich ungleich schneller vollzieht. Noch einmal: Unsere Zivilisation ist entstanden aufgrund einer außergewöhnlichen Stabilität des Klimasystems in den letzten 11000 Jahren – wir legen es gerade darauf an, diese Stabilität zu zerstören.

## Sie warnen vor einer „Heißzeit“ auf dem Globus, die am Ende stehen könnte. Was bedeutet das konkret?

Der Begriff „globale Erwärmung“ ist für den Fall, dass es durch einen Dominoeffekt bei den Kippelementen zu einem Temperatur-

anstieg von fünf, sechs Grad oder langfristig noch mehr kommt, viel zu harmlos. Dann würden große Flächen des Planeten wohl tatsächlich unbewohnbar. Das wäre also eine Heißzeit, analog zur Eiszeit, mit ähnlich dramatischen Bedingungen.

## Wären die Folgen eines möglichen Dominoeffekts bereits in diesem Jahrhundert konkret zu spüren? Also von den nächsten ein, zwei Generationen?

Vor zehn Jahren hätte ich noch gesagt: Nein. Inzwischen schätze ich: Solche Domino-Dynamiken könnten sich im Falle eines ungebremsen Klimawandels bereits bis Ende des Jahrhunderts abspielen. Die nach dem Jahr 2000 Geborenen könnten das Zusammenbrechen der Regenwälder zum Beispiel durchaus noch erleben.

## Gibt es überhaupt noch eine Chance, die Kippelemente zu schützen? Was müsste dafür geschehen?

Wenn wir die Erwärmung bei 1,5 Grad stoppen, kommen wir wohl mit einem blauen Auge davon. Dann finden die allermeisten Kippprozesse nicht statt. Ein solches Szenario ist vorstellbar, aber leider nicht sehr realistisch. Die pragmatische Verteidigungslinie wird wohl weiter bei zwei Grad liegen müssen. Das würde die gravierendsten Folgen der menschlichen Klimastörung noch abwenden. Ich wiederhole, dass dafür die Dekarbonisierung der gesamten Weltwirtschaft bis 2050 erforderlich wäre – in den Industrieländern, also auch in Deutschland, eigentlich sogar bis 2040.

## Ist das zu schaffen?

Durchaus. Bei uns hat sich ja bereits einiges bewegt. Bis vor kurzem war eine Festlegung auf Klimaneutralität bis 2050 noch undenkbar; jetzt ist es offizielle Position der Bundesregierung. Und auch 2040 ist machbar. Ich sehe da eine klare Bewegung zum Positiven, und sie ist auch absolut notwendig. Ohne diese Bewegung riskieren wir tatsächlich den Fortbestand unserer Wohlfahrts-gesellschaft. Das ist ein ernster Satz, den man nicht leichtfertig dahinsagt.

## Bisher laufen die Klimapläne der Staaten der Erde auf einen Dreißig bis Vier-Grad-Erwärmungspfad zu. Wenn der Kippelemente-Dominoeffekt ohnehin droht, hilft

### ZUR PERSON



**Hans Joachim Schellnhuber**, 69, ist Direktor Emeritus des Potsdam-Instituts für Klimafolgenforschung (PIK), das er 1992 gegründet hat. Der renommierte Klimaforscher war Professor für Theoretische Physik an der Universität Potsdam und von 2009 bis 2016 Vorsitzender des Wissenschaftlichen Beirats der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU). Er ist langjähriges Mitglied des Weltklimarats (IPCC). EPD

## es dann überhaupt noch. Anstrengungen zu unternehmen, um näher an die zwei Grad zu kommen? Der nächste Klimagipfel in Glasgow ist wegen Corona bereits verschoben worden.

Es gibt keinen Grund, die Flinte ins Korn zu werfen. Die Gefahr besteht natürlich, dass die Klimathematik wegen Corona jetzt wieder für eine Weile in den Hintergrund tritt, wie nach der Finanzkrise 2008 geschehen. Wichtig ist jedoch, dass am Pariser Klimaabkommen und der Zwei-Grad-Grenze nicht getüfelt wird.

## Noch einmal zurück zum Anfang des Interviews. Der Weltklimarat IPCC hat die Problematik der Kippelemente bereits vor zwei Jahrzehnten dargestellt. Wieso kommt Ihre Warnung vor dem „Notfall“ gerade jetzt?

Im IPCC-Bericht von 2001 war erstmals von „Large-Scale Discontinuities“ die Rede. Ich habe diese Thematik und Begrifflichkeit damals mit einigen Koautoren gegen große Widerstände in den Bericht eingebracht. Gemeint waren Prozesse, die sich abrupt und/oder irreversibel ändern können, wenn nur kleine Störungen der Rahmenbedingungen erfolgen. Wir waren seinerzeit davon ausgegangen, dass die meisten dieser Prozesse erst bei fünf, sechs Grad Erderwärmung ausgelöst würden. Im jüngsten IPCC-Bericht ist die entsprechende Marke nun schon auf zwei Grad heruntergerutscht. Den Begriff Kippelemente habe ich übrigens in einer Vorlesung geprägt, die ich 2001 in Oxford gehalten habe.

## Zwei statt fünf Grad – wie das?

Es gab anfangs einfach nur wenig Forschung dazu. Die Lage ist nun ganz anders. Wir haben zu fast jedem Kippelement genauere Untersuchungen. Dass die Korallenriffe absterben, kann man heute leider schon direkt beobachten. Wir stellen fest, dass sich Methanquellen überall im Permafrost auftun. Wir haben neue Studien, die zeigen, dass sich der Golfstrom bereits um 15 Prozent abgeschwächt hat. Die Eisschilde Grönlands und der West-Antarktis beginnen vor unseren Satellitenaugen zu tauen. Mit anderen Worten: Man hat vorher nichts gesehen, weil man nicht genau hingeschaut hat. Oder nicht konnte. Die falsche Gefühl der Sicherheit war gewissermaßen ignoranzbedingt.

## Andere Forscher wie der Direktor am Hamburger Max-Planck-Institut für Meteorologie, Professor Martin Claussen, sehen die Lage weniger dramatisch. Claussen sagt, von einem Notfall zu sprechen, sei zu alarmistisch.

Die Lage ist ernst, darüber müssen wir uns im Klaren sein. Alarmismus ist, nebenbei gesagt, ein Begriff, den die Klimaleugner in den USA erfunden haben, um die Forschung zu diskreditieren. Aber in der Tat: Ich schlage Alarm. Wenn ich in einem brennenden Haus bin und nach der Feuerwehr rufe – ist das alarmistisch? Jetzt immer noch nicht Alarm zu schlagen, wäre schlichtweg verantwortungslos.

### 1) Korallenriffe wie das bekannte

Great Barrier Reef in Australien drohen abzusterben, vor allem, weil das Wasser in den Meeren immer wärmer wird. Mit welcher Begrenzung der globalen Erwärmung könnten große Teile der Riffe noch erhalten werden?  
a. plus 1,5 Grad  
b. plus 2 Grad  
c. plus 3 Grad

### 2) Die globale Erwärmung könnte der trockenen Sahel-Zone schon relativ bald segensreichen Monsunregen bescheren. Aus den kargen Ausläufern der Sahara könnten grüne Regionen werden, wenn sich das Klima über zwei Grad hinaus erwärmt. Ist das nicht wünschenswert?

a. Ja, weil Bauern und Viehhirten dann dort bessere Lebensbedingungen finden.  
b. Nein, weil den positiven Entwicklungen in dieser Region zahlreiche negative fast überall sonst in der Welt entgegenstehen.  
c. Es gibt keine Hinweise, dass die Sahara ergrünen könnte.

### 3) In den Permafrostböden der Erde in Sibirien, Alaska und Nordkanada sind bis zu 1500 Milliarden Tonnen Kohlenstoff gespeichert, zweimal mehr als in der Erdatmosphäre. Ihr Auftauen kann den Treibhauseffekt stark anheizen. Tauen die Böden bereits?

a. nein  
b. ja, aber so, wie von den Klimaforschern bisher vorausgesagt  
c. ja, und zwar schneller als erwartet

### 4) Klimaforscher befürchten, dass der Amazonas Regenwald, der fünfzehn mal so groß ist wie Deutschland, austrocknet. Ursache sind die fortgesetzte Abholzung und das Abbrennen der Wälder sowie der Anstieg der globalen Temperatur. Was passiert, wenn der Wald verschwindet?

a. Es entsteht eine artenarme Savannenlandschaft.  
b. Es entsteht ein neuer, stabiler Sekundärwald.  
c. Die Auswirkungen auf den globalen Kohlenstoff-Austausch zwischen Atmosphäre und Biosphäre sind nur gering.

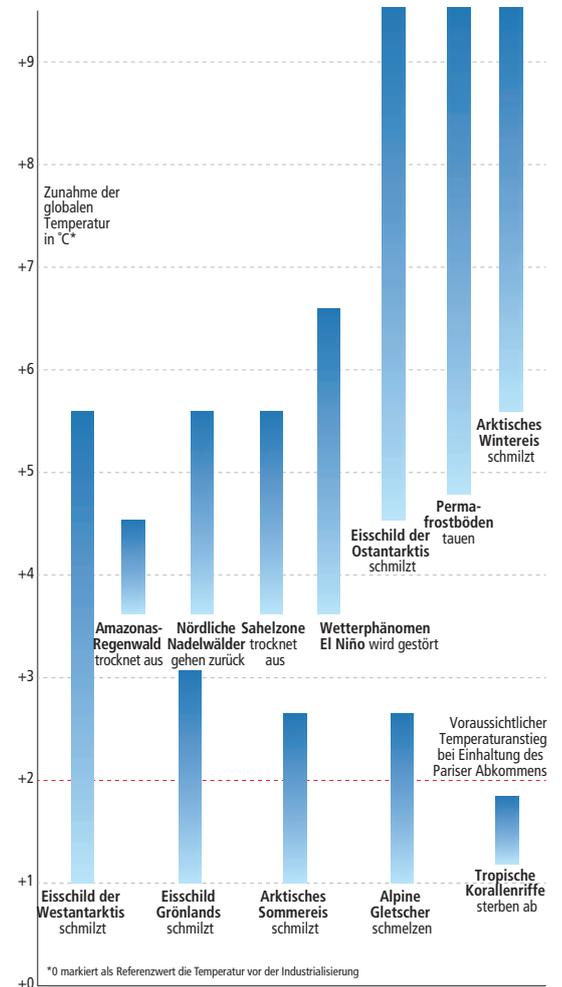
### 5) Sinkt der CO<sub>2</sub>-Ausstoß global weiterhin nicht, könnten die großen Eisschilde der Erde in Grönland und in der Antarktis komplett abschmelzen. Das würde den Meeresspiegel um insgesamt über 60 Meter erhöhen. Es gibt Anzeichen, dass dieser Prozess bereits begonnen hat. Wie lange würde das komplette Abtauen dauern?

a. bis 2100  
b. 500 Jahre  
c. mehrere Tausend Jahre

Antworten unterhalb der Grafik.

## Wann ist welcher Kippunkt erreicht?

Je stärker die globale Temperatur zunimmt, desto größer wird die Gefahr für die Kippelemente



Quelle: PIK/Schellnhuber, Rahmstorf, Winkelmann: Nature Climate Change 6, 2016