

ERNEUERBARE ENERGIEN

## Wellenkraft dümpelt beharrlich voran

In den Ozeanen schlummern ungenutzte Kräfte

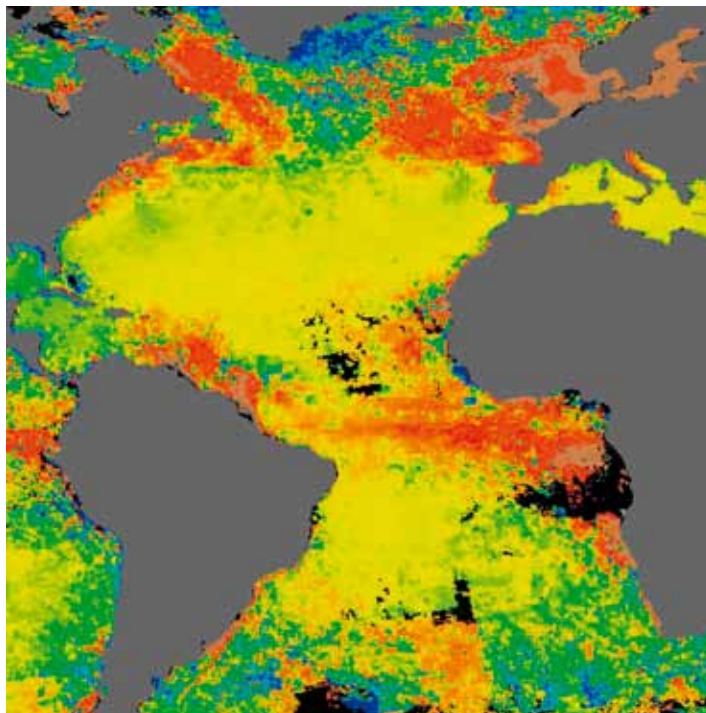
VON JAN OSTERKAMP

Verschiedene Formen von Offshore-Pionieranlagen ernten schon seit einiger Zeit Wellenenergie aus dem Meer. Alle leiden noch unter Kinderkrankheiten und haben die technischen Herausforderungen ihrer harschen Umgebung nur halb gelöst.

Wenn etwas seit Anbeginn stetig blieb in unserer Welt, so war es das ewige Hin und Her der ozeanischen Wassermassen. Kaum verwunderlich, dass der Mensch dieses unerschöpfliche Reservoir der Bewegungsenergie anzapfen will, um Energie für eigene Zwecke zu speichern und zu nutzen. Ozeanwellen Energie abzutrotzen, verspricht allerdings ein weit härterer Kampf zu werden als der mit längst ausgereiften Wasserkraftwerken in den Flüssen der Kontinente.

Ein paar Gründe dafür haben nun die Wellenkraftexperten Jeff Scraggs und Paul Jacob zusammengefasst – mitsamt Argumenten dafür, warum Ingenieure sich der Herausforderung »rentables Wellenkraftwerk« dennoch unbedingt weiter stellen sollten. Der Hauptgrund ist eine auf den ersten Blick hohe Zahl: Mindestens 280 Terawattstunden pro Jahr könnten sich allein an Europas Küsten aus dem Meer in die Stromnetze ziehen lassen, errechneten Forscher schon im vergangenen Jahrtausend. Doch damit könnte Offshore-Wasserkraft allein heu-

Fortsetzung Seite 4



© NASA

KLIMASCHUTZ

## Wahl der Waffen

Was ist das richtige technische Rezept gegen die Erderwärmung?

VON DANIEL LINGENHÖHL

Kohlendioxid versenken, Sonnenstrahlung spiegeln, Atmosphäre impfen, Meere düngen – im Kampf gegen die Aufheizung der Erde werden viele Möglichkeiten diskutiert. Denn Energiesparen allein wird uns wegen der Trägheit der Menschheit nicht retten. Doch welche Methoden helfen wirklich und ohne Risiko?

1000 Jahre: So lange blieben uns die klimatischen Folgen der heute ausgestoßenen Treibhausgase noch erhalten, selbst wenn wir ab heute kein zusätzliches Kohlendioxid oder Methan mehr in die Atmosphäre blasen würden. Auch dann müsste die Menschheit noch mit höheren Durchschnittstemperaturen, gestiegenen Meeresspiegeln und veränderten Niederschlagsmustern leben, deren Wandel sie durch ihr Handeln im 20. und 21. Jahrhundert angestoßen hat. Das zumindest sagt eine Berech-

nung des Klimaforscherquartetts um Susan Solomon von der US-Wetterbehörde NOAA voraus, die von einem – hypothetischen – Stopp weiterer Emissionen nach Erreichen eines Spitzenwerts ausgeht [1]. Ein Teil des CO<sub>2</sub> in der Atmosphäre würde demnach auch wieder bald abgebaut werden. Auf der anderen Seite gasten die Ozeane aber einen Teil des zuvor aufgenommenen Kohlendioxids auch wieder aus, weshalb die Konzentration in der Luft überdurchschnittlich hoch bliebe, so die Forscher.

Fortsetzung Seite 2

Liebe  
Leserin,  
lieber  
Leser,



seltsamerweise interessieren wir uns vielmehr für unser Wetter, als für unser Klima. Dabei können wir uns dagegen schützen, es aber nicht beeinflussen. Anders beim Klima: Dies wandeln wir momentan wohl dramatisch. Vor den angestoßenen Änderungen schützen können sich viele künftig aber wenig.

Über den Stand der Dinge berichtet dieses Dossier.

Es grüßt herzlich  
**Richard Zinken**

### IN DIESER AUSGABE:



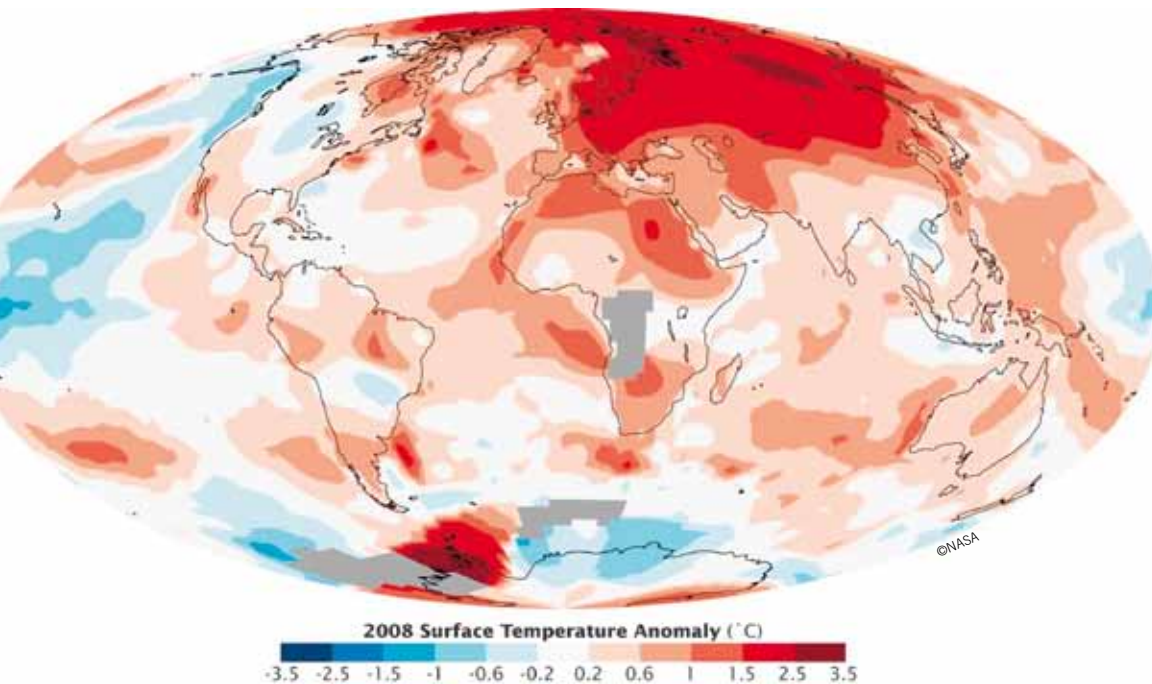
**AUSZUG AUS THOREAUS WALD**  
Literarisches Erbe dokumentiert leidende Pflanzenfamilien



**VON DER KÜHLTRUHE ZUM HEIZKISSEN**  
Gesamte Antarktis wird netto wärmer statt kälter



**„ALLES LÄUFT ROUTINEMÄSSIG“**  
Wie steht es um Deutschlands Vorzeigeveruch zur CO<sub>2</sub>-Einlagerung?



### Temperaturanomalien 2008

Auch im vergangenen Jahr herrschten in weiten Teilen der Erde überdurchschnittliche Temperaturen im langjährigen Vergleich. Kühler war es dagegen vor allem im Pazifik, wo La Niña kaltes Wasser über große Regionen brachte.

Wie der Planet im Jahr 3000 aussähe, darüber gibt die Studie keine Auskunft: Niemand weiß, wie schnell sich Mensch und Natur an die heute schon ablaufenden klimatischen Veränderungen anpassen können. Viele Wissenschaftler gehen jedoch davon aus, dass der Wandel zu rasch abläuft, als dass große Teile von Flora und Fauna ihm folgen oder die Menschheit gegensteuern könnten. Es muss also gehandelt werden, um die Aufheizung der Erde zumindest so weit zu verlangsamen, dass Katastrophenszenarien ausbleiben. Nur wie? Als einfachste und naheliegendste Lösung

gilt, Energie zu sparen und auf alternative Quellen wie Sonne, Wind oder Erdwärme umzusteigen. Angesichts der Kosten und Widerstände der Öffentlichkeit sowie der allgemein trägen Reaktion der Menschheit könnte dies allerdings zu lange dauern. Fachleute und Politiker diskutieren deshalb auch immer wieder das so genannte Geoen지니어ing, also technische Maßnahmen, um die Erwärmung einzudämmen. Eine Reihe davon haben nun Tim Lenton und Nem Vaughan von der University of East Anglia im britischen Norwich auf ihre Machbarkeit abgeklopft [2].

### Meeresmanipulation: machbar, aber nur mit langem Atem

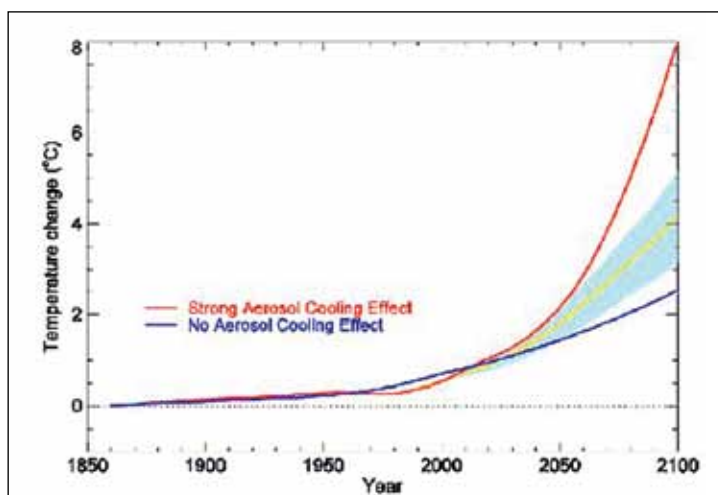
Ein Projekt unter deutscher Beteiligung beispielsweise hat gerade erst die Nachrichten beherrscht: die Düngung der Meere. Sie soll künstliche Algenblüten auslösen, die Kohlenstoff aus der Luft aufnehmen, zumindest einen Teil davon nach ihrem Absterben in die Tiefsee verfrachten und dem System für längere Zeit entziehen. Konsequenterweise angewendet, ließe sich die Senkenkapazität der Ozeane damit erhöhen – ein natürlicher Prozess, der mancherorts seit Jahrmillionen stattfindet. Eine grundlegende Voraussetzung ist jedoch ein entsprechendes Algenwachstum, an dem es aber großflächig mangelt.

Über weite ozeanische Gebiete hinweg schweben zwar genügend gelöste Nährstoffe durch das Wasser, die den mikroskopisch kleinen Pflanzen eine Lebensbasis bieten könnten. Doch mangelt es ihnen meist an einem essenziellen Element: Eisen. Ohne dieses Me-

tall ist ihre Vitalität gehemmt – und ihre fotosynthetische Leistungsfähigkeit bleibt hinter dem theoretisch möglichen zurück. Es läge also nahe, dem Meer Eisen künstlich zuzuführen, das Algenwachstum dadurch zu stützen und so den Planeten vor Überhitzung zu schützen, meinen viele Forscher.

Mehrere Versuche in dieser Richtung wurden bereits unternommen. Das jüngste Experiment des Alfred-Wegener-Instituts in Bremerhaven etwa soll im Südatlantik großflächig Eisendünger ausbringen, um die biochemische Reaktion des Meeres zu testen. Es geriet jedoch in die Mühlen von Umweltverbänden, Bundesumwelt- und Bundesforschungsministerium. Erst nach langem Hin und Her erhielten sie die Genehmigung, ihren Versuch durchzuführen – unter weiterhin lautem Protest von Naturschützern, die eine auch von Deutschland ausgehandelte Konvention der Vereinten Nationen gegen diese Art der Ozeanmanipulation verletzt sehen.

Auf wissenschaftlicher Ebene haben bisherige Experimente gezeigt, dass Eisengaben durchaus



### Aerosole und Erwärmung

Temperaturanstieg berechnet für den Zeitraum von 1850 bis 2100 (die gelbe Linie entspricht den früheren Schätzungen)

das Algenwachstum anheizen, was auch eine neue Studie von Raymond Pollard vom National Oceanography Centre in Southampton und seinen Kollegen belegt [3]. Unklar blieb bislang jedoch, wie viel CO<sub>2</sub> dadurch tatsächlich der Atmosphäre dauerhaft entzogen wird und wie viel nach dem Tod des Planktons wieder freikommt. Die Meeresbiologen verglichen deshalb die biologische Aktivität zweier Gebiete in der Nähe der südatlantischen Crozet-Inseln.

Diese Eilande bestehen aus eisenreichem vulkanischem Gestein, das über die Erosion den Ozean fruchtbarer macht – wegen der vorherrschenden Meeresströmungen jedoch nur Flächen nördlich von Crozet. Nur hier blühten die Algen wochenlang auf und exportierten in der Folge zwei- bis dreimal so viel Kohlendioxid in die Tiefsee wie im südlichen, düngereichen Vergleichsgebiet. Ein erster Hinweis, dass diese Methode netto tatsächlich Entlastung versprechen könnte – obwohl die versenkten Kohlenstoffmengen hinter den bislang

vermuteten zurückblieben. Auch Lenton und Vaughan erkennen die Potenz der Eisengabe an. Werden dem Meer gleichzeitig auch noch Phosphate, Stickstoff und Kalziumkarbonat zugeführt und der Energieverbrauch gesenkt, könnte der atmosphärische CO<sub>2</sub>-Gehalt bis Ende des Jahrhunderts sogar wieder auf vorindustrielle Werte sinken. Doch die Folgen für die ozeanische Umwelt wären wohl gravierend: Sauerstoffmangel in der Tiefsee, Überdüngung und Giftalgenblüten in Küstennähe, übersäuertes Wasser und veränderte Lebensgemeinschaften – von den logistischen Schwierigkeiten, die nötigen Mengen an Nährstoffen ins Meer zu bringen, einmal abgesehen.

#### An Land oft nur lokale Wirkung

Klimabeeinflussung ganz anderer Art schwebt den Geotechnikern an Land vor. Sie setzen hier vor allem auf eine Erhöhung der Albedo – der Menge der ins All reflektierten Sonnenstrahlung. Je heller eine Fläche ist und je höher ihre Albedo ausfällt, desto weniger Energie wird in Wärme um-

gewandelt und heizt die Erde auf. So soll der Anbau bestimmter Getreidesorten den Treibhauseffekt abmildern: Um bis zu ein Grad Celsius könnte dadurch die durchschnittliche Lufttemperatur im Sommer in den USA und in weiten Teilen Europas sinken, hofft etwa Andy Ridgwell von der University of Bristol. Getreidefelder kühlen bereits jetzt die Erde, weil sie mehr Sonnenlicht reflektieren als etwa Wiesen. Wählt man Sorten mit hoher Albedo in den nächsten 100 Jahren geschickt aus, ließe sich der Heizeffekt von 195 Milliarden Tonnen Kohlendioxid kompensieren, meint der Forscher – immerhin der Ausstoß von vier bis fünf Jahren.

Noch stärker wäre die Wirkung, erhöhte man die Albedo der planetaren Wüsten, was manche Geoingenieure tatsächlich diskutieren. Um drei Watt pro Quadratmeter könnte die Rückstrahlungsleistung der Trockengebiete erhöht werden, bedeckte man sie großflächig mit hellen und spiegelnden Materialien – mehr als genug, um nicht nur diese

Regionen, sondern die gesamte Erde einigermaßen abzukühlen. Neben Kosten- und Produktionsfragen müsste aber auch noch ein trivialer, aber sehr bedenkenswerter Punkt behandelt werden, so Lenton und Vaughan: Wer putzt diese Flächen, da Staub und anderer Dreck sie auf Dauer zu sehr verschmutzen würden?

Eine Gegenmaßnahme scheint dagegen nicht nur praktikabel, da sie relativ kostengünstig wäre. Sie brächte auch noch weitere Vorteile für Mensch und Natur: die Aufforstung oder Wiederbewaldung von Ödland, das einst schon mit Bäumen bestanden war. Nachwachsende Wälder würden zumindest einen Teil des freigesetzten Kohlendioxids für die Zeit ihres Lebens einlagern; daneben böten sie Holz als Rohstoff, Lebensraum für viele Arten und den Schutz vor Bodenerosion und von Wasserquellen. Dies sollte aber möglichst mit »Bio«-Holzkohleproduktion kombiniert werden, so die beiden Wissenschaftler. Das unvollständig umgesetzte Holz mit extrem hohem Kohlenstoffgehalt arbeitet

#### Polarstern

Das Forschungsschiff Polarstern auf offener See



© ALFRED-WEGENER-INSTITUT

#### DOSSIER Klimawandel



#### KLIMAWANDEL

Kaum jemand zweifelt noch daran, dass der Mensch dem Planeten Erde kräftig einheizt. Welche Folgen davon jetzt schon zu sehen sind und welche Auswirkungen uns noch in der Zukunft erwarten, bietet allerdings noch viel Stoff für Diskussionen.

[spektrumdirekt.de/klima](http://spektrumdirekt.de/klima)

man dann in den Boden ein, wo es für lange Zeit eingelagert wäre. Zusammengefasst brächte diesen Methoden einen stärkeren Kühleffekt als die Ozeandüngung.

### Schwefelschirm: hohes Potenzial, großes Risiko

Das größte Potenzial billigen Lenton und Vaughan einer anderen Erdmanipulation zu, die dort stattfindet, wo sich auch der Klimawandel anbahnt: in der Atmosphäre. Etwa ein Drittel der täglichen eingestrahelten Sonnenenergie reflektieren oder absorbieren die Wolken, Aerosole, Gase und Moleküle der Luft. Erhöht man den Anteil der dort oben sofort wieder ins All geschickten Strahlung, könnte man die Erde gut abkühlen – eine Idee, die viele Anhänger hat. Sie orientie-

ren sich dabei vor allem am Einfluss starker Vulkanausbrüche, die riesige Mengen von Asche und Schwefelsäuretröpfchen in den Himmel katapultieren. Beide wirken als Sonnenschirm, und so sanken nach großen Eruptionen wie der des Krakatau, des Tambora oder des Pinatubo weltweit die Temperaturen, weil weniger Energie bis zum Erdboden durchdrang. Diesen Effekt wollen die Techniker künstlich wiederholen, indem sie die Atmosphäre mit Schwefelpulver impfen. Die entstehenden Aerosole sollen dann die vulkanische Wirkung nachahmen.

Bis 2050 könnte diese Methode so weit gediehen sein, dass sie die Erdtemperaturen in einem Rahmen regelt, wie er zu Beginn der Industrialisierung herrschte.

Unter allen potenziellen Anwendungen birgt sie jedoch auch die meisten Risiken, warnen Lenton und Vaughan: Kontinuierlich müsste der Schwefel nachgefüttert werden, da ihn Wind und Wetter wieder austragen, und ohne Nachschub verliert sich der Kühleffekt rasch. Im Gegenzug könnte es sogar – bei fortgesetzter Freisetzung von Treibhausgasen – zu einem extremen und raschen Anstieg der Temperaturen kommen, sollte die Luft wieder schwefelrein sein.

Schwefelschirm wie Aufforstung und Ozeandüngung stellen immerhin einigermaßen effektive Mechanismen dar, die Erderwärmung zu bremsen – im Gegensatz zur künstlichen Einlagerung von Kohlendioxid in der Tiefsee oder der biologisch ausgelösten

Wolkenbildung über den Ozeanen. Ihr Einfluss wurde in der Vergangenheit überschätzt, fassen die beiden Wissenschaftler zusammen. Die »Rettung« der Menschheit wie der Erde bietet das Geoengineering allerdings ohnehin nicht, so Lenton: Ohne Energieeinsparung nützt auf Dauer alles nichts. <<

[1] Solomon, S. et al.: Irreversible climate change because of carbon dioxide emissions. In: Proceedings of the National Academy of Sciences 10.1073/pnas.0812721106, 2009.

[2] Lenton, T., Vaughan, N.: The radiative forcing potential of different climate geoengineering options. In: Atmospheric Chemistry and Physics Discussion 9, S. 2559-2608, 2009.

[3] Pollard, R. et al.: Southern Ocean deep-water carbon export enhanced by natural iron fertilization. In: Nature 457, S. 577-581, 2009.

## KLIMAWANDEL

# Kohlendioxid-Emissionen steigen stärker als befürchtet

Der jährliche Ausstoß von Kohlendioxid hat seit 1992 um 38 Prozent zugenommen. Er erhöhte sich von 6,1 Milliarden Tonnen Kohlenstoff auf 8,5 Milliarden im Jahr 2007. Dies berichten Forscher um Gregg Marland vom Oak Ridge National Laboratory.

Laut Forschern des australischen Forschungsinstitut CSIRO angesiedelten »Global Carbon Project« seien die Emissionen seit dem Jahr 2000 vier Mal so schnell gestiegen wie im Jahrzehnt davor. Dennoch sei die CO<sub>2</sub>-Konzentration in

der Atmosphäre seit dem Jahr 2000 rund ein Drittel schneller gewachsen als in den 20 Jahren zuvor. Sie erreichte im vergangenen Jahr 383 Teilchen CO<sub>2</sub> pro einer Million Teilchen Luft (ppm). Vor Beginn der Industrialisierung lag sie um 1750 noch unter 280 ppm.

Die Hauptproduzenten des Treibhausgases verlagerten sich im Laufe dieses Zeitraums von West nach Ost. Vor allem sich wirtschaftlich schnell entwickelnde Länder wie China und Indien steigerten ihren Ausstoß, während gleichzeitig die west-

lichen Industrienationen ihren prozentualen Anteil verringern konnten. 1992 waren die Vereinigten Staaten der größte Produzent von Kohlendioxid vor China, Russland, Japan und Indien. 2006 nahm China diesen Platz ein.

Im Rahmen des 1997 beschlossenen Kyoto-Protokolls verpflichteten sich 38 Industrienationen, den Ausstoß von Treibhausgasen zu verringern, um die Klimaerwärmung zu stoppen. Das 2005 in Kraft getretene Abkommen schrieb erstmals völkerrechtlich bin-

dende Zielwerte für die Emission von Treibhausgasen vor.

Die Forscher stützen ihre Aussagen unter anderem auf Energie-Daten der Vereinten Nationen von 2005. Marland räumte allerdings ein, dass die Zahlen insbesondere der gerade aufstrebenden Schwellenländer unsicher seien. (cw) <<

FORTSETZUNG VON SEITE 1

# Wellenkraft dümpelt beharrlich voran

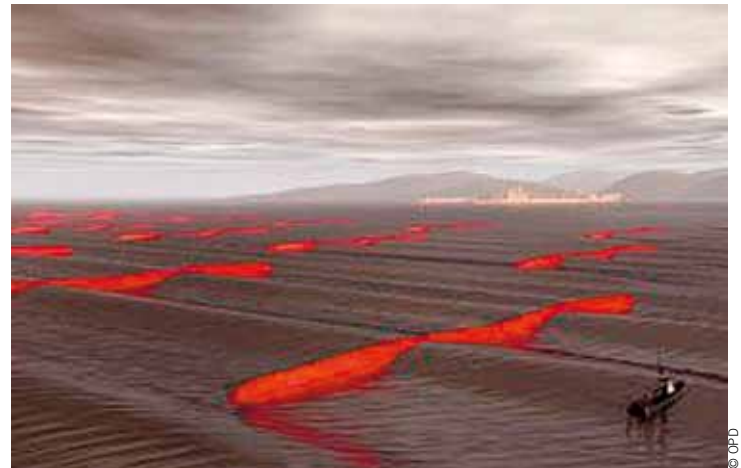
te nicht mehr als die Hälfte des derzeitigen deutschen Stromverbrauchs decken. Lohnt der Aufwand?

## Wogen abernten

Wellen haben Tücken, beginnen die Forscher von der Duke University in Durham und MMI Engineering in Houston die problematischen Aspekte des Energieträgers bewegter Ozean zu umreißen. So verteilt sich die innewohnende Kraft über eine große Fläche – eben die gesamte Front und Breite der Woge –, und diese Wellen schwappen dann zudem notorisch unregelmäßig nacheinander. Ein Rotor in einem Strom erzeugenden Generator wird demnach nur unständig angetrieben – während gleichzeitig ein Großteil der Energie einer Wellenfront ungenutzt vorbeirauscht.

Aus all dem haben verschiedene Ingenieure verschiedene Schlüsse gezogen – die Designs der derzeit erprobten Wellenkraftwerke könnten unterschiedlicher kaum sein. Auf breiter Front statt mit kleinen Rotoren agiert etwa das Prinzip Seeschlange, der »Pelamis«. Er besteht aus vier 30 Meter langen Zylindertonnen, die durch Hydrauliken zu einer langen, auf der Meeresoberfläche dümpelnden Kette zusammengeschlossen sind. Das Schaukeln der Dünung bewegt Kolben zwischen den einzelnen Elementen, die Öl unter hohem Druck durch Strom erzeugende Generatoren pressen. Einige Einzelwellen hintereinander werden so genutzt – das Problem, wechselnde Wellenfrequenzen abfangen zu müssen, besteht im Prinzip nicht. Der Prototyp des Systems war in Schottland erfolgreich, und seit letztem Jahr liefert eine Anlage aus vier Seeschlangen vor Portugal bis zu 2,25 Megawatt.

Punktgenau statt möglichst flächendeckend sollen so genannte Power-Bojen Wellenenergie abgreifen. Ein von der Firma Ocean Power Technologies seit Jahren langsam immer weiter perfektioniertes System nutzt dabei den Hub der einzelnen Wellen, um fest im Boden verankerte Teile und auftriebende Schwimmer der Bojen gegeneinander zu verschieben. Bei Resonanz des Strom erzeugenden Innenlebens mit der Frequenz der Wellenkurve wird Strom wirtschaftlich auch bei vergleichsweise stiller See produziert. Versuchsanlagen werden gerade weltweit installiert, vor Spanien und der Westküste der USA sollen sie 1,4 sowie 2 Megawatt



## Pelamis

Die Illustration der Ocean Power Delivery zeigt, wie mehrere Pelamis-Geräte eine Wasserkraftfarm bilden können.

fördern. Ein Problem solcher Anlagen ist die notwendige Verankerung im Boden. Tatsächlich, so rechnen Scruggs und Jacob, lohnen sich Wellenkraftwerke besonders bei Wassertiefen ab 40 Metern, da sonst viel Energie wegen der Wechselwirkungen von Wellen mit dem Grund verbraucht werden. Mehr als 100 Meter tief sollte das Meer aber nicht sein – der Stromtransport zur Küste und die Bodenverankerung werden dann unrentabel kostspielig und aufwändig. Unter den aggressiven Umweltbedingungen der Ozeane leiden auch weniger ambitionierte, küstennahe Projekte: Winterstürme mit etwas zu viel überschüssiger Kraft ruinierten immer wieder Anlagen, die eigentlich zur Gewinnung von Wellenenergie gedacht waren.

Viel zu wenig, so die Autoren, haben sich Techniker zudem um einen weiteren Punkt gekümmert: die Regeltechnik der Anlagen auf

die variablen Wellenenergiemengen einzustellen. Es sollte doch möglich sein, aus der Reihenfolge der in der Vergangenheit eingetroffenen Wogen einen statistischen Schätzwert zu berechnen, der das Eintreffen des nächsten Wellenkamms prognostiziert und dessen energetische Verwertung dann optimiert. Sicherlich könnte ein solches System die Effizienz einer Wellenanlage der Zukunft deutlich steigern: Auch hier sollte investiert werden, finden Scruggs und Jacob. Und zwar möglichst bald: In jeder Sekunde und Minute verbleibt an allen Küsten der Welt Energie ungenutzt, denn jeder laufende Meter einer Drei-Meter-Welle enthält eine Leistung von über 20 Kilowatt – bevor sie sich am Strand bricht und verläuft. <<

Scruggs, J., Jacob, P.: Harvesting ocean wave energy. In: Science 323, S. 1176-1178, 2009.

## DOSSIER Meere



### MEERE

Aus dem Meer kommt alles Leben – und noch heute sind die Ozeane von übergeordneter Wichtigkeit für uns Menschen. Sie liefern Nahrung, speichern Kohlendioxid und sind gewichtiger Teil des globalen Wasserkreislaufs. Dennoch wissen wir immer noch wenig über sie.

[SPEKTRUMDIREKT.DE/MEER](http://SPEKTRUMDIREKT.DE/MEER)

KLIMAWANDEL

# Auszug aus Thoreaus Wald

Literarisches Erbe dokumentiert leidende Pflanzenfamilien

VON DANIEL LINGENHÖHL

Er zog in die Wälder, um ein neues Leben auszutesten – und notierte eifrig, was um ihn herum kreuchte und fleuchte. Heute dient Henry David Thoreaus »Walden« nicht nur der Erbauung der alternativen Szene. Es macht auch Klimaforscher glücklich.

*Ich zog in den Wald, weil ich den Wunsch hatte, mit Überlegung zu leben, dem eigentlichen, wirklichen Leben näherzutreten, zu sehen, ob ich nicht lernen konnte, was es zu lehren hätte, damit ich nicht, wenn es zum Sterben ginge, einsehen müsste, dass ich nicht gelebt hatte. Ich wollte nicht das leben, was nicht Leben war; das Leben ist so kostbar. Auch wollte ich keine Entsagung üben, außer es wurde unumgänglich notwendig. Ich wollte tief leben, alles Mark des*

*Lebens aussaugen, so hart und spartanisch leben, dass alles, was nicht Leben war, in die Flucht geschlagen wurde.» (Henry David Thoreau, Walden oder Leben in den Wäldern, 1854)*

Dieses Zitat – in abgewandelter Form – verführte nicht nur die Mitglieder des »Clubs der toten Mitglieder« in Peter Weirs gleichnamiger Tragikomödie zu einem intensiveren Leben außerhalb der engen Mauern der konserva-

tiven Welton Academy. Thoreaus Buch »Walden« inspirierte auch außerhalb der Literatur ganze Generationen amerikanischer Leser und gilt als eines der wegweisenden Werke der frühen Naturschutz- wie der Studentenbewegung der 1968er. Sogar Mahatma Ghandi soll sein Ideal des gewaltfreien Widerstandes und seiner asketischen Lebensführung ausdrücklich auf dieses Werk des US-amerikanischen Schriftstellers und Philosophen zurückge-

führt haben. »Walden« ist das literarisch umgesetzte Tagebuch Thoreaus über seinen Rückzug in die Wälder von Concord im US-Bundesstaat Massachusetts, in denen er ab 1845 für mehr als zwei Jahre siedelte: Er wollte dort einen alternativen Lebensstil verwirklichen, der ihm in der Zivilisation verwehrt zu werden schien. In insgesamt 18 Kapiteln schreibt der Eremit auf Zeit über die Tiere des Waldes, seine Gedanken zur Ökonomie der Nation, die Ein-

## Was ist eigentlich spektrumdirekt?

spektrumdirekt ist die Online-Zeitung aus dem Verlag Spektrum der Wissenschaft.

Täglich berichtet die Redaktion von spektrumdirekt verständlich und unterhaltsam über neueste Erkenntnisse aus Wissenschaft und Forschung.

In den Händen halten Sie ein Themenspezial Klimawandel. Wenn es Ihnen gefällt, besuchen Sie uns doch auf

[www.spektrumdirekt.de](http://www.spektrumdirekt.de)

Weitere Informationen finden Sie unter

[www.spektrumdirekt.de/info](http://www.spektrumdirekt.de/info)



spektrumdirekt.de

samkeit und Askese, aber auch über seine Besuche in einem nahe gelegenen Dorf, dass er regelmäßig aufsuchte, um Neuigkeiten über die Welt da draußen zu erfahren. Selbst heute noch – mehr als 150 Jahre nach der Erstauflage – erweitert es den Horizont seiner Leser: etwa jenen von Charles Willis von der Harvard University und seiner Kollegen.

### Literat und Naturforscher

Sie interessieren sich allerdings weniger für die philosophischen als für die naturwissenschaftlichen Ansätze des Bandes, denn Thoreau war ebenso ein akribischer Forscher, der die Wälder und Felder um Concord über Jahrzehnte hinweg studiert hat. Der Freigeist notierte ausführlich, wo welche Pflanzen vorkommen und wann diese blühen. Immer wieder haben Biologen darauf zurückgegriffen und sie um ihre Daten ergänzt: Entstanden ist daraus eine einzigartige Sammlung, die den ökologischen Wandel der Region über eineinhalb Jahrhunderte hinweg dokumentiert – was



### Henry David Thoreau

Der amerikanische Schriftsteller und Philosoph Henry David Thoreau (1817–1862) inspirierte mit seinen Werken die Naturschutzbewegung.

sie für heutige Wissenschaftler unschätzbar macht.

Dank der langen Zeitreihe konnten die Biologen um Willis etwa erkennen, dass seit der Mitte des vorletzten Jahrhunderts mehr als ein Viertel aller Pflanzenarten, die Thoreau damals katalogisiert hatte, in der Gegend ausgestorben sind. Ein weiteres Drittel existiert vor Ort zudem nur noch in so winzigen Mengen, dass ihr baldiges lokales Erlöschen befürchtet werden muss – obwohl sehr viel Land um Concord unter Naturschutz steht oder seit damals kaum verändert wurde.

Deshalb lässt sich nur ein Teil der Verluste mit veränderten Nutzungsbedingungen vor Ort nachvollziehen: Farmer gaben ihre Felder auf, die bald zuwucherten, Feuchtgebiete wurden entwässert oder Weiden aufgeforstet. Doch dies allein erkläre noch nicht, warum bestimmte Pflanzenfamilien überproportional oft verloren gingen, obwohl ihre Mitglieder ein breites Spektrum an Biotopen besiedeln, meinen die Wissenschaftler – etwa Korbblütler, Orchideen, Rosen-, Hahnenfuß- und Rötengewächse, Weiden oder Lippenblütler.

### Fluch der Verwandtschaftsverhältnisse

Es müsse folglich ein Einflussfaktor verantwortlich sein, der großräumig und über alle Lebensräume hinweg wirkt, so die Forscher, die schnell den Klimawandel im Verdacht hatten: Immerhin erwärmte sich die Region während der letzten 100 Jahre um 2,4 Grad Celsius. Viele Pflanzen passten sich dem rasch an, weshalb sich die Blühzeiten durchschnittlich um rund eine Woche nach vorne verlagerten – allerdings bei Weitem nicht bei allen der 473 untersuchten Spezies und vor allem nicht völlig zufällig in allen Pflanzenfamilien. Vielmehr kristallisierten sich



©DETROIT PUBLISHING CO. 1908

auch hier enge phylogenetische Zusammenhänge heraus.

Gerade bei eng verwandten Pflanzen, die nicht früher, sondern immer noch zur annähernd gleichen Zeit wie bei Thoreau blühten, gingen die Bestände zurück. Hatten sie zudem einen Verbreitungsschwerpunkt in eher nördlichen Gefilden, verschlimmerte sich das Desaster noch – verglichen mit dem Einfluss des Verwandtschaftsgrades spielte das jedoch nur eine zweitrangige Rolle. Familien, die bislang nach Süden tendierten, sehr flexibel auch auf kurzfristige Temperaturschwankungen reagieren können oder generell ihren Lebenszyklus nach vorne terminierten, hielten sich dagegen deutlich besser.

Warum die Arten leiden, die dem Klimawandel nicht folgen können, ist noch nicht abschließend geklärt: Womöglich fehlen ihnen zur Blütezeit die bestäubenden Insekten, die vielfach ihren Rhythmus ebenfalls nach vorne verlagern. Oder aber ihr Auftreten fällt nun in eine Phase, in der mehr Fressfeinde unterwegs sind, die Blüten und Samen schädigen. Für die Zukunft

### Walden

An diesem Punkt stand um 1845 die Hütte von Thoreau am Ufer des Sees Walden. Knapp drei Jahre lebte der Autor in den Wäldern Massachusetts.

verheißt das wohl noch größere Umwälzungen für Thoreaus Rückzugsort: Ein weiterer Temperaturanstieg zwischen 1,1 und 6,4 Grad Celsius werden für den Nordosten der USA in den unterschiedlichen Klimamodellen prognostiziert, was nach den neuen Erkenntnissen wohl vor allem bestimmte Pflanzenfamilien treffen wird – und sie »aus dem Netz des Lebens« reißen könnte, wie die Forscher schreiben. Ob Thoreau angesichts dieser Entwicklung sich auch heute noch so ekstatisch über den Einzug des Frühlings freuen könnte wie damals: »Jede Jahreszeit hat ihren eigenen Reiz, die Ankunft des Frühlings ist wie die Geburt des Kosmos aus dem Chaos und der Anbruch des Goldenen Zeitalters«? <<

Willis, C. et al.: Phylogenetic patterns of species loss in Thoreau's woods are driven by climate change. In: Proceedings of the National Academy of Sciences 10.1073/pnas.0806446105, 2008.

## KLIMAWANDEL

# Von der Kühltruhe zum Heizkissen

Gesamte Antarktis wird netto wärmer statt kälter

VON DANIEL LINGENHÖHL

**Sie ist – noch – eine der großen Unbekannten im Wandel unserer Zeiten: Erwärmt sich die Antarktis nun und schmilzt? Oder kühlt sie sogar weiter aus – und mildert damit die Aufheizung der Erde? Neue Erkenntnisse aus dem tiefen Süden lassen Ungutes erahnen.**

Emotionale Worte, etwas anderes fiel einem ansonsten wohl eher sachlich-nüchtern argumentierendem Forscher nicht mehr ein, als er an den Ort des Geschehens gelangte. »Ich habe noch nie zuvor so etwas Ehrfurcht gebietendes gesehen. Wir flogen die Bruchlinie entlang und beobachteten das gigantische Ausmaß der Bewegung weg von dem Spalt. Riesige, hausgroße Eisbrocken lagen und schwammen herum, als wären sie wie Schutt ausgekippt worden. Es sieht aus wie nach einer Explosion«, berichtete Jim Elliott vom British Antarctic Survey (BAS) von seinem Beobachtungsflug, der ihn über das sich auflösende Wilkins-Eisschelf geführt hatte.

Nur noch ein dünner Streifen aus fragilem Meereis zwischen zwei Inseln schützt den Rest des einst 16 000 Quadratkilometer großen

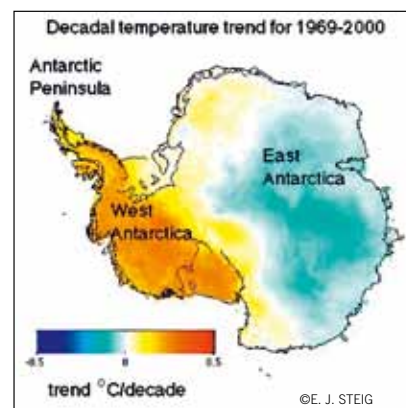
Wilkins-Eisschelfs an der Küste der Antarktischen Halbinsel vor Wind, Wetter und Gezeiten, die ihn bald völlig zermürben und zerstören könnten. Mehrere tausend Quadratkilometer dieses alten und dicken Eispakets sind bereits zerfallen und treiben nun als Eisberge durch die See – darunter Riesen von der Größe der britischen Isle of Man. Immerhin: »Der Meeresspiegel steigt dadurch nicht, da Wilkins ohnehin schon auf dem Wasser schwimmt. Aber die Entwicklung bezeugt, dass der Klimawandel die Region beeinflusst«, erläutert David Vaughan vom BAS.

1993 hatte der Forscher prognostiziert, dass zumindest der nördliche Teil des Wilkins-Eisschelfs innerhalb von 30 Jahren verschwinden dürfte, sollte sich die Region weiterhin in hohem Tempo erwärmen: Um mehr als drei Grad Celsius liegen die Durchschnittstemperaturen heute höher als vor 50 Jahren – ein Anstieg, der weltweit nur in Alaska zu finden ist. Doch nun könnte Wilkins deutlich schneller Larsen A und B, Muller, Jones oder Prinz Gustav nachfolgen, deren Eispakete bereits der jüngeren Vergangenheit angehören. »Wilkins ist das größte Eisschelf der Halbinsel, den die Erwärmung nun bedroht. Ich hätte nicht gedacht,

dass die Dinge sich so schnell entwickeln. Das Schelf hängt nun an einem seidenen Faden«, zeigt sich Vaughan überrascht und besorgt.

Die neuen Erkenntnisse von Eric Steig von der University of Washington in Seattle und seinen Kollegen dürften den britischen Forscher nicht beruhigen, widerlegt ihre Arbeit doch das lange vorgetragene Mantra, große Teile der Antarktis würden sich dem globalen Aufwärmungstrend entziehen. Dieser These zufolge sollte sich der Eiskontinent trotz der starken Erwärmung auf der Halbinsel netto sogar noch weiter abkühlen, weil über den deutlich größeren Landmassen der West- und Ostantarktis die Temperaturen weiter fielen. Der Grund: das Ozonloch. Dieses verstärkt durch sein winterliches Ausdünnen die atmosphärische Zirkulation um die Antarktis, weshalb der Luftmassenaustausch mit höheren – wärmeren – Breiten unterbunden wird. Dies kühle die Antarktis weiträumig zunehmend aus, so die vorherrschende Meinung.

Doch dem ist offensichtlich nicht so. »Überall hört man, dass die Antarktis kälter wird. Das ist aber nicht der Fall – wenn überhaupt, dann ist das Gegenteil richtig«, so Steig. Im Gegensatz zu anderen Weltgegenden mangelte es lange an Daten von dem Südkontinent: Satelliten erfassen ihn erst seit etwa 25 Jahren richtig, und Wetterstationen stehen zwar seit 1957 vor Ort, jedoch meist nur an der Küste – im großen Rest herrschte Leere. Steigs Team entdeckte nun allerdings, dass die Satellitendaten sehr eng mit je-

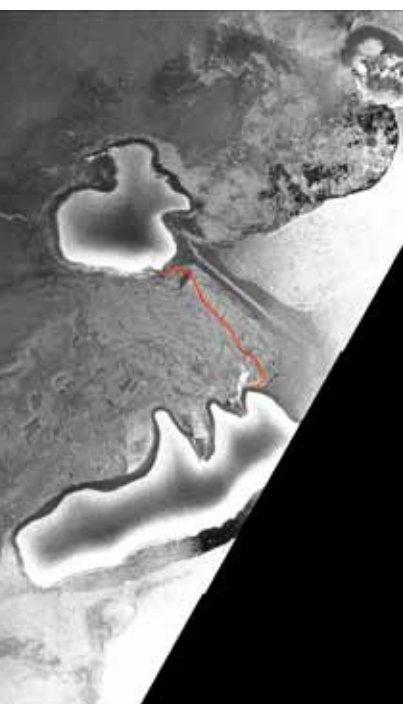


## Temperaturentwicklung zwischen 1969 und 2000

Das Ozonloch sorgte dafür, dass sich die Ostantarktis zwischen 1969 und 2000 abkühlte. Es beeinflusste aber entgegen der Erwartungen nicht den westlichen Teil des Kontinents, der sich schon in dieser Zeit erwärmte.

nen der Wetterstationen übereinstimmen – niemand zuvor hatte beide Messreihen kombiniert und damit ein derart exaktes Bild erhalten. Aus den Temperaturmessungen früherer Zeiten konnten die Forscher deshalb die bislang unbekannteren damaligen Werte aus dem Landesinneren ableiten.

Zusammengenommen zeigen sie einen klaren Trend: Auch außerhalb der Antarktischen Halbinsel erwärmten sich große Areale des Kontinents – in einem ähnlichen Ausmaß wie der Rest des Planeten. Im Durchschnitt stiegen die Temperaturen seit 1957 um 0,5 Grad Celsius, allerdings mit starken regionalen Unterschieden. So fiel die Zunahme im Westteil deutlich stärker aus als im Osten. »Die Westantarktis ist ganz anders als die Ostantarktis, weil das Transantarktische



## Satellitenaufnahme des »seidenen Fadens«

Zwischen den beiden Inseln in der Bildmitte befindet sich noch ein intakter Streifen des Wilkins-Eisschelfs, der den intakten Bereich dahinter schützt. Noch vor einem Jahr war diese Barriere deutlich mächtiger (rote Linie).



Gebirge die Landmasse strikt trennt«, erläutert Steig. Das Inlandeis ragt westlich des Höhenzugs mit 2000 Metern über dem Meer deutlich weniger weit in die Atmosphäre auf als jenes östlich davon, das immerhin über 3000 Meter hoch ist.

Die Westantarktis gelangt daher öfter in den Einflussbereich relativ warmer und feuchter Luftmassen, die Schnee bringen, aber auch mildere Bedingungen. Zugleich beeinflusst das Ozonloch diese Kontinenthälfte schwächer, so dass der Kühleffekt ausfällt und stattdessen die Temperaturen überproportional steigen. Ihre Zunahme überwiegt jene Abnahmen, die in wenigen Teilbereichen östlich des Transantarktischen Gebirges in den letzten Jahrzehnten aufgetreten sind.

Damit entzieht sich also auch der antarktische Kühlschrank nicht dem globalen Trend zur Aufheizung. Was das für die Zukunft der Eisschilde bedeutet, bleibt noch unklar – das schützende Meereis vor der Westantarktis beginnt sich allerdings schon aufzulösen wie in der Amundsen-Bellinghaus-See. Eine eigentlich positive Nachricht könnte zukünftig sogar noch mehr Ungemach bedeuten, fürchtet Steig: »Bald werden die Maßnahmen zum Schutz der Ozonschicht wirken. Und dann wird sich die gesamte Antarktis wie der Rest der Welt erwärmen.« <<

**Steig, E. et al.:** Warming of the Antarctic ice-sheet surface since the 1957 International Geophysical Year. In: Nature 457, S. 459-463, 2009.

## KLIMAFORSCHUNG

## Grönlandeis bis Amazonaswald: Neun Schlüsselstellen fürs Klima

Der grönländische Eisschild und der Amazonas-Regenwald gehören nach Ansicht führender Klimaforscher zu den neun Schlüsselstellen des Klimawandels. In diesen Bereichen könnten schon kleine Veränderungen riesige Auswirkungen haben – die Systeme könnten leicht kippen.

Neben dem grönländische Eisschild gehört das arktische Meereis zu den besonders anfälligen »Kippelementen«, berichtet die Gruppe um den britischen Geowissenschaftler Timothy Lenton und den Leiter des Potsdam-Instituts für Klimafolgenforschung, Hans Joachim Schellnhuber. Sie hatte die Ergebnisse eines Workshops mit 36 führenden Klimaforschern, der Befragung von 52 Experten und wissenschaftliche Literatur berücksichtigt. Die neun Kippelemente sollten in der Klimapolitik besonders berücksichtigt werden.

Wenn das arktische Meereis schmilzt, kommt darunter die dunklere Wasseroberfläche hervor. Da sie mehr Sonnenstrahlen aufnimmt als weiße Eisflächen, wird die Erwärmung verstärkt. Das übrige Eis schmilzt schneller. Die kritische Grenze könnte bei einem halben bis zwei Grad Celsius Erwärmung liegen, sodass die Arktis bereits in wenigen Jahrzehnten im Sommer eisfrei sein könnte. Beim grönländischen Eisschild tragen schmelzende Gletscher



**Regenwald in Brasilien**

Der Amazonas-Regenwald gehört zu den neun Schlüsselstellen des Klimawandels.

zunächst den Rand des Schildes ab, was zu weiterer Erwärmung und Eisverlust führe. Steigt die Temperatur dort um mehr als drei Grad Celsius, könnte der Eisschild bereits innerhalb von 300 Jahren abschmelzen und der Meeresspiegel um sieben Meter steigen. Auch der Westantarktische Eisschild könnte in dieser Zeit abtauen, dessen Kippunkt liege bei einer Erwärmung der Region von fünf bis acht Grad.

Die Borealwälder im Norden der Erde werden nach Forschungsansicht bei drei bis fünf Grad Erwärmung durch Trockenheit und Hitze im Sommer und Krankheiten innerhalb von 50 Jahren großenteils absterben. Der Amazonasregenwald wird durch Entwaldung und Erwärmung

derart geschädigt, dass er nach Modellaussagen in dieser Zeitspanne ebenfalls großflächig zerstört sein könnte. Für die Sahara mitsamt der Sahelzone ist noch unklar, ob sie trockener oder feuchter werden als bislang.

Als weitere Kippelemente nennen die Forscher das Klimaphänomen El Niño, den indischen Sommermonsun sowie den große Wasserkreislauf im Atlantik, die thermohaline Atlantikzirkulation. <<

Proceedings of the National Academy of Sciences  
10.1073/pnas.0705414105 (2008)

## ALTERNATIVE ENERGIEN

# Miserable Werte für Agrartreibstoffe

Ein vernichtendes Zeugnis haben Wissenschaftler der Universität von Minnesota in St. Paul und aus Princeton Agrarkraftstoffen ausgestellt, für deren Produktion natürliche Ökosysteme umgewandelt wurden. Werden brasilianische Regen- oder indonesische Sumpfwälder zu diesem Zweck gerodet, entsteht zwischen 17- bis 423-mal so viel Kohlendioxid wie jährlich durch den auf diesem Land gewonnenen Treib-

stoff eingespart werden soll. Verglichen mit fossilen Brennstoffen gilt der so genannte Biodiesel als klimafreundlich, da er beim Verbrennen nur so viel CO<sub>2</sub> freisetzt, wie beim Wachstum der Pflanzen aufgenommen wurde.

Nach den Berechnungen von David Tilman und seinen Kollegen, schneidet jedoch vor allem Palmöl aus Südostasien sowie Treibstoff aus brasilianischem

Soja miserabel ab [1]: Erst nach 423 beziehungsweise 319 Jahren ununterbrochener Spritproduktion auf ehemaligen Waldflächen wäre die Kohlendioxid-Bilanz wieder ausgeglichen, da beim Abbrennen der ursprünglichen Vegetation enorme Mengen des Treibhausgases freigesetzt werden. Zudem entweicht viel Kohlendioxid aus entwässerten und umgebrochenen Böden. Etwas weniger schlecht sieht die Bilanz

für Ethanol aus Zuckerrohr in früherem Cerrado Brasiliens – eine Art Savanne – oder aus Mais von amerikanischen Prärie-Gebieten aus. Doch dauert es auch hier 17 bis 93 Jahre bis sich die ursprünglichen Emissionen wieder amortisiert haben.

Einzig die Produktion von Agrarkraftstoffen auf aufgegebenen landwirtschaftlichen Flächen, der Anbau lokaler und dauerhafter



©DAVID TILMAN

**Regenwald**

In tropischen Regenwäldern sind enorme Mengen Kohlendioxid in der Vegetation gespeichert, die bei der Abholzung freigesetzt werden und den Klimawandel verschärfen.



©WETLANDS INTERNATIONAL

**Brandrodung**

Brandrodung von Regenwäldern setzt jährlich mehr Kohlendioxid frei als das Transportgewerbe weltweit.

Energiepflanzen auf bisherigem Farmland sowie die Nutzung von Pflanzenabfällen hätte eine sofortige Reduzierung von CO<sub>2</sub> zur Folge. Allerdings nur, wenn es dadurch nicht zu einem Verdrängungseffekt kommt, wie es sich in den Vereinigten Staaten schon abzeichnen beginnt. Dort erhalten Farmer Subventionen für den Anbau von Mais zur Ethanol-Gewinnung und verzichten daher auf den zweijährigen Wechsel mit Soja für die Tiermast. In der Folge kaufen Viehzüchter das Futter in Brasilien ein, wo wegen der steigenden Soja-Preise vermehrt Regenwald abgeholzt wird.

Ein ähnlich negatives Ergebnis ermittelten Timothy Searchinger und seine Kollegen aus Princeton, die die Kohlendioxid-Bilanz von Ethanol auf Mais- sowie Chinaschilf-Basis berechneten. Demnach spart Kraftstoff auf Maisbasis nicht zwanzig Prozent CO<sub>2</sub> im Vergleich zu fossilem Benzin oder Diesel ein, sondern verdoppelt die Kohlendioxid-Emissionen über dreißig Jahre hinweg. Allein dieser Beitrag erhöhte die Konzentration an Treibhausgasen in der Atmosphäre um fast 170 Jahre, bis der Ausstoß durch Pflanzenwachstum wieder kompensiert wurde. Wird statt Mais Schilfgras angebaut, steigern sich die Emissionen immerhin noch um die Hälfte.

In ihren Berechnungen gehen die Wissenschaftler davon aus, dass die USA bis 2016 etwa 56 Millionen Liter Ethanol mehr als heute produzieren werden. Um die entsprechende Menge Mais anzubauen, benötigten die Farmer 12,8 Millionen Hektar Land, auf

dem gegenwärtig noch Getreide für Nahrungsmittelproduktion und -export wächst. Dadurch steigen die Preise für Mais sowie für Soja und Weizen, was die Landumwandlung in anderen Regionen beschleunigt, wie gegenwärtig in Amazonien zu beobachten ist. Gleichzeitig müssen die Exportausfälle der Vereinigten Staaten kompensiert werden, was in den betroffenen Ländern ebenfalls neue Erschließungen notwendig macht.

»Will man die Erderwärmung eindämmen, macht es keinen Sinn, Land für die Kraftstoff-Produktion umzuwandeln«, erklärt deshalb der an der Studie beteiligte Joseph Fargione. »Alle Bio-Treibstoffe, die wir gegenwärtig verwenden, zerstören Ökosysteme«, so seine scharfe Kommentierung. (dl) <<

[1] Science 10.1126/science.1152747 (2008)

[2] Science 10.1126/science.1151861 (2008)

## MEERESÖKOLOGIE

# Meere versauern schneller als erwartet

Die pH-Werte der Ozeane unterliegen im Tages- und Jahresverlauf deutlich stärkeren Schwankungen als bislang bekannt. Außerdem sinken sie entgegen bisheriger Prognosen insgesamt rascher durch die Aufnahme von Kohlendioxid – zumindest regional. Das ist das Ergebnis einer achtjährigen Messreihe von Wissenschaftlern um Timothy Wootton von der University of Chicago, die dem Pazifik vor der Küste des US-Bundesstaates Washington knapp 25 000 Wasserproben entnommen hatten.

Innerhalb von 24 Stunden kann der pH-Wert demnach um 0,24 Einheiten ab- und wieder zunehmen, was mit der fotosynthetischen Leistung des Planktons zusammenhängt: Tagsüber entzieht sie dem Wasser Kohlendioxid, weshalb das Meer basischer wird. Nachts sinkt der Wert dagegen wieder, da mehr CO<sub>2</sub> abgegeben und durch Diffusion gelöst wird, als biologische, chemische oder physikalische Prozesse dem System entziehen. Im Jahresverlauf können die Werte sogar um bis zu 1,5 Einheiten schwanken – etwa wenn im Winter die Fotosyntheseleistung sinkt oder das Wasser sich erwärmt, weshalb sich weniger Kohlendioxid darin löst. Steigt verstärkt kaltes Tiefenwasser auf, reduziert sich der pH-Wert an der Oberfläche ebenfalls, da dabei große Mengen an CO<sub>2</sub> mitgeführt wird.

Abgesehen von diesen periodischen Zu- und Abnahmen machten die Forscher allerdings

über die Jahre hinweg auch einen allgemeinen Trend zu niedrigeren pH-Werten aus. Im Laufe des Untersuchungszeitraums fielen sie demnach durchschnittlich um etwa 0,05 Einheiten jährlich: Das ist rund 25 Mal schneller, als Computersimulationen bei zunehmenden Kohlendioxidgehalten in der Atmosphäre bislang prognostizierten. Nicht ausgeschlossen werden kann allerdings, dass sich hinter dem nahezu weltweit zu beobachtenden Trend abnehmender ozeanischer pH-Werte auch noch ein weiterer lokaler und periodischer Versauerungsschub verbirgt, der vor Ort zeitweilig verstärkend wirkt.

Sollte er sich allerdings bestätigen und auch zukünftig in diesem Ausmaß andauern, sind weit gehende Umwälzungen der Meeresökosysteme zu erwarten. So reagieren verschiedene Muschelarten und Entenmuscheln – die trotz ihres Namens zu den Krebstieren gehören – sehr empfindlich auf die Versauerung, wie Woottons Team ebenfalls beobachtete: Die Tiere benötigen Karbonate aus dem Wasser, um ihre Kalkschalen aufzubauen, was fallende pH-Werte erschweren oder gar verhindern. Während längerer, saurer Perioden wurden sie häufig von verschiedenen Algen oder schalenlosen Weichtieren ersetzt. (dl) <<

**Wootton, T. et al.:** Dynamic patterns and ecological impacts of declining ocean pH in a high-resolution multi-year dataset. In: Proceedings of the National Academy of Sciences 105, S. 18848–18853, 2008.

KLIMASCHUTZ

## »Alles läuft routinemäßig«

Wie steht es um Deutschlands Vorzeigerversuch zur CO<sub>2</sub>-Einlagerung?

DAS GESPRÄCH FÜHRTE DANIEL LINGENHÖHL.

Seit 30. Juni läuft im brandenburgischen Ketzin ein Projekt zur Einlagerung von Kohlendioxid im Untergrund. spektrumdirekt sprach mit Projektleiter Frank Schilling über den Versuch.

In den nächsten zwei Jahren sollen in Ketzin bis zu 60 000 Tonnen CO<sub>2</sub> in über 600 Metern Tiefe gespeichert werden. Unter Federführung des Geoforschungszentrums in Potsdam untersuchen Wissenschaftler erstmals, wie das Treibhausgas in tief gelegenen, mit Salzwasser gefüllten porösen Gesteinsschichten eingebracht und gespeichert werden kann und wie es sich dort verhält.

**spektrumdirekt:** Herr Schilling, wie läuft der Testbetrieb bislang?

**Frank Schilling:** Bis jetzt läuft alles routinemäßig, wir hatten noch keine Probleme. Mittlerweile befinden sich 420 Tonnen Kohlendioxid bereits im Boden, wo es sich wie gewünscht ausbreitet. Die ersten 50 Meter bis zum Standort der Beobachtungsbohrung hat es schon zurückgelegt. Dies konnten wir über unseren Krypton-Marker nachweisen – das Gas haben wir als Marker dem Kohlendioxid zugefügt, um es leichter überwachen zu können.

**spektrumdirekt:** Wie muss man sich den Versuchsaufbau vorstellen?

**Schilling:** Wir haben eine weltweit einmalige Konstellation. Neben der Injektionsbohrung in den Sandstein, der als Speicher fungieren soll, haben wir auch zwei Beobachtungsbohrungen niedergebracht, um den Versuch aufzuzeichnen und Daten zu gewinnen. Insgesamt sind sie wie ein L aufgebaut. Mit ihrer Hilfe können wir das Projekt dreidimensional abbilden und beobachten. Daneben überwachen



wir, ob Gase austreten und ob und wie sich Gase und Flüssigkeiten im Untergrund ausbreiten.

**spektrumdirekt:** Und gibt es schon Anzeichen dafür, wie sich das CO<sub>2</sub> dort unten verhält?

**Schilling:** Das Kohlendioxid verdrängt das Salzwasser aus den Poren des Sandsteins. Es geht teilweise in Lösung oder reagiert mit Feldspäten aus dem Gestein zu Kalk, wodurch es fest gebunden wird. Über dem Sandstein liegt wie eine Käseglocke eine sehr dichte Tonschicht, die den Speicher nach oben hin dicht versiegelt und das CO<sub>2</sub> gefangen hält. Dazwischen liegen zudem 600 bis 700 Meter Deckgebirge. Mindestens die nächsten 100, eher aber die nächsten 10 000 Jahre wird dort kein Kohlendioxid aus dem Sandstein in die Atmosphäre austreten. Allenfalls an den Bohrlö-

chern droht nach dem Abschluss theoretisch Gefahr, doch werden diese ebenfalls fest abgedichtet.

**spektrumdirekt:** Könnte Ketzin später auch der industriellen Kohlendioxid-Lagerung dienen?

**Schilling:** Nein, es ist kein Speicher für großtechnische Anlagen. Es dient nur Testzwecken. Richtig große Speicher lägen zudem in 1000 und mehr Metern Tiefe. Auch würde man sie in geologisch noch homogenen Gebieten einrichten. In Deutschland wäre dafür vor allem die norddeutsche Tiefebene geeignet, wo idealerweise unter Salzschieben gespeichert würde. Süddeutschland wäre dagegen tektonisch komplizierter.

**spektrumdirekt:** Und wie sieht es mit der Entsorgung unter dem Meeresboden aus?

### Testanlage in Ketzin

Die Testanlage in Ketzin während der Bauarbeiten: Seit 30. Juni 2008 wird hier zu Versuchszwecken Kohlendioxid in der Tiefe versenkt.

**Schilling:** Prinzipiell wäre dieser Weg sehr gut, denn die Tiefsee böte noch mehr Sicherheiten für das im Meeresboden gespeicherte Gas. Durch Dichteunterschiede oder neu entstehende Gashydrate wäre es sehr fest dort unten gebunden. Auch in der Nord- und Ostsee wird nach möglichen Endlagern gesucht, doch sind sie zu eigentlich zu flach. Die Gashydrate entstehen erst ab rund 3000 Metern in der Tiefsee.

**spektrumdirekt:** Wir danken Ihnen für das Gespräch.

### SPEKTRUMDIREKT FRAGT NACH

Alle Interviews von **spektrumdirekt** im Überblick

<http://www.spektrumdirekt.de/interviews>

## KLIMAFORSCHUNG

# Pause für die Erderwärmung?

Nach Ansicht deutscher Forscher könnte die in den letzten Jahren beobachtete Aufheizung der Erde im nächsten Jahrzehnt ausgesetzt werden. Verursacht werde die Pause durch eine natürliche Schwankung von Meeresströmungen im Atlantik, so Noel Keenlyside und seine Kollegen vom Leibniz-Institut für Meereswissenschaften in Kiel. Ab 2020 sei dann aber wieder mit zügig steigenden Temperaturen zu rechnen.

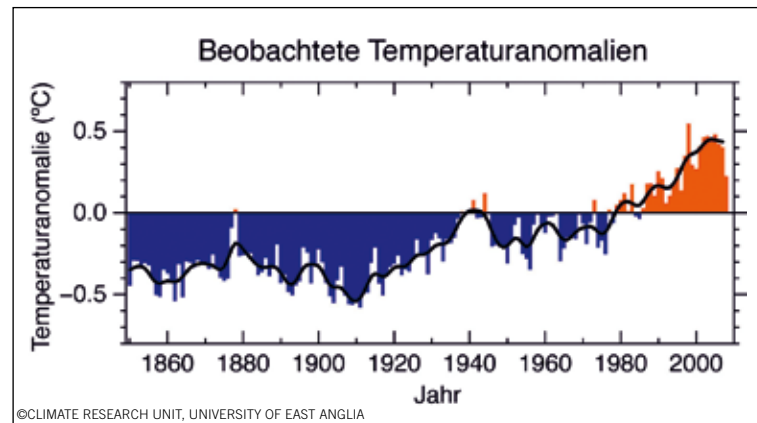
Nach den Computersimulationen der Wissenschaftler schwächt sich die thermohaline Zirkulation im Nordatlantik in den nächsten Jahren ab, so dass weniger warmes Wasser aus den Tropen gen Nordeuropa und Nordpolarmeer transportiert wird. Dadurch kühlen sich Teile Europas, aber auch Nordamerikas und Asiens leicht ab, weil die Energiezufuhr aus Süden schwächt. Ein ähnliches Phänomen hat sich auch während des letzten Jahrhunderts beobachten lassen, als die Temperaturen nach einem Anstieg vor dem zweiten Weltkrieg wieder ab den 1940er Jahren zwischenzeitlich sanken. Diese Schwankungen bezeichnet man auch als Atlantische Multidekadale Oszillation (AMO), die einen Rhythmus von 60 bis 70 Jahren aufweist.

Den Blick in die Zukunft wagt Keenlysides Team durch eine Rückschau auf die Vergangenheit. Sie entwickelten eine Methode, mit der sie die Meeresströmungen aus den Oberflächentemperaturen des Ozeans ableiteten. Letztere sind für die vergangenen 50 Jahre gut bekannt. Mit dieser zusätzlichen

Information konnten sie in ihren Klimamodellen die kurzfristigen natürlichen Klimaschwankungen vorhersagen, welche die seit mehr als einem Jahrhundert beobachtete, vom Menschen verursachte Erwärmung bisweilen überlagern.

Die derart verbesserten Klimaprognosen lassen nun vermuten, dass sich die Aufheizung zukünftig etwas abschwächt – allerdings nur für maximal 15 bis 20 Jahre. Anschließend setzt sich der Klimawandel wieder verstärkt fort: »Den generell nach oben weisenden Trend überlagert nur eine Art Schwingung, die in langen Zeitabständen wiederkehrt. In den nächsten Jahren führt sie zu einem geringeren Temperaturanstieg«, fasst Mojib Latif, der Leiter der Forschungsgruppe zusammen. Das bedeute aber nicht, dass es deshalb keine von Menschen ausgelöste Erderwärmung gäbe. (dl) <<

**Keenlyside, N. et al.:** Advancing Decadal-Scale Climate Prediction in the North Atlantic Sector. In: Nature 453 (7191), S. 84-88, 2008.



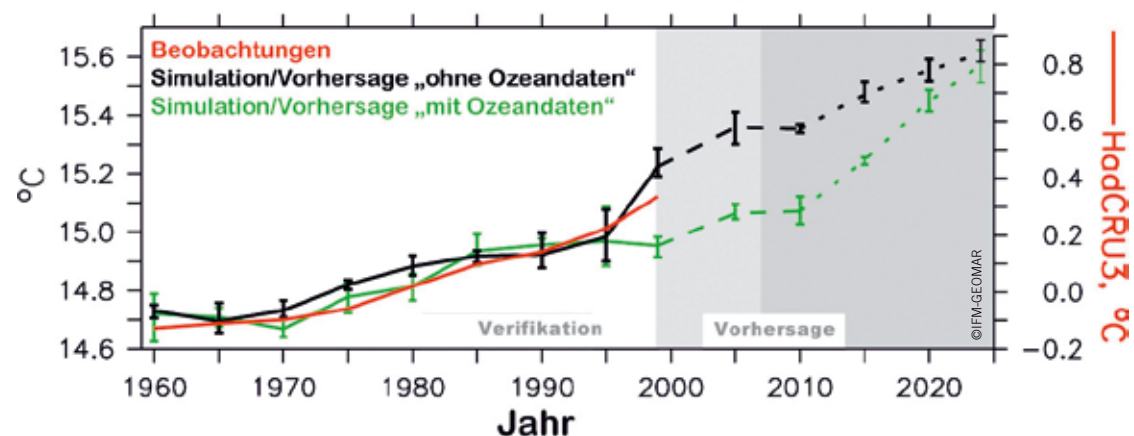
## Temperaturanomalien der letzten Jahrzehnte

Seit rund dreißig Jahren weichen die Temperaturen im globalen Mittel stets nach oben ab – während in den Jahrzehnten zuvor eher der umgekehrte Fall eintrat. Der Kurvenverlauf (schwarz) deutet allerdings an, dass es seit Beginn der Industrialisierung einen nahezu ungebrochenen Trend nach oben gibt, der nur durch periodische Schwankungen abgeschwächt wird. Nun könnte wieder eine leichte Abkühlung folgen, die ab 2020 in einer verstärkten Aufheizung enden könnte.

## Gebremste Erwärmung

Folge dieser langfristigen, periodischen Klimaschwankung, die von atlantischen Meeresströmungen ausgelöst wird: In den nächsten Jahren steigen die Temperaturen um 0,2 Grad weniger an (grüne Linie), als bisherige Modelle vorhersagen (schwarze Linie).

## Globale Oberflächentemperaturen



## ÖKOLOGIE

## Regenwälder schlucken viel Kohlendioxid

Intakte Tropenwälder nehmen etwa 20 Prozent der jährlich von der Menschheit verursachten Kohlendioxidemissionen auf und sind damit effektive Kohlenstoffspeicher. Allein die afrikanischen Regenwälder des Kongobeckens entziehen der Atmosphäre jedes Jahr 1,2 Milliarden Tonnen CO<sub>2</sub>, wie Erhebungen von Simon Lewis von der University Leeds und seinen Kollegen zeigen. Die Forscher griffen dazu auf 40-jährige Datenreihen von 79 Testflächen im Urwald Gabuns zurück: Alle dort stehenden Bäume mit einem Stammdurchmesser von mehr als zehn Zentimetern wurden in dieser Zeit vermessen und ihr Dickenwachstum vermerkt, aus dem sich wiederum der Biomassezuwachs berechnen lässt: Jeder Hektar speicherte demnach 0,6 Tonnen Kohlenstoff pro Jahr, ohne dass darin schon die ebenfalls aktiven Wurzeln und kleineren Holzgewächse berücksichtigt wären.

Die Zahlen von Lewis ähneln jenen des Amazonasbeckens und Südasiens, wo ähnliche Erhebungen laufen. Insgesamt könnten die Regenwälder damit 4,8 Milliarden Tonnen CO<sub>2</sub> im Jahr aufnehmen, was sie zur bedeutendsten Kohlenstoffsенке an Land macht: Rund 50 Prozent der landgebundenen Speicherkapazität entfällt auf dieses Ökosystem – mehr nehmen nur die Ozeane auf. Alle Senken zusammen absorbieren etwas mehr als die Hälfte der von der Menschheit jährlich produzierten 32 Milliarden Tonnen CO<sub>2</sub>, der Rest bleibt in der Atmosphäre und trägt zur Erderwärmung bei.

Warum aber selbst intakte Regenwälder zusätzlich Kohlenstoff einlagern und nicht in einem



©SIMON LEWIS

### Im Kongo

Forscher messen den Stammumfang eines Urwaldriesen im Kongoregenwald.

Gleichgewicht aus Aufnahme und Abgabe – etwa durch Atmung oder aus sich zersetzendem Bestandsabfall – stehen, lässt die Forscher rätseln. Möglicherweise düngt das zusätzliche CO<sub>2</sub> die Pflanzen und regt deren Wachstum an. Helene Muller-Landau vom Smithsonian Tropical Research Institute im panamaischen Balboa vermutet dagegen einen anderen Grund: Ihrer Meinung nach könnten sich die Regenwälder immer noch von früheren schweren Eingriffen des Menschen erholen und hätten folglich »Nachholbedarf«. Die Regenwaldgebiete Amazoniens oder des Kongo waren vor Ankunft der Europäer womöglich viel dichter besiedelt als heute und die Waldflächen kleiner. Krankheiten und Kriege entvölkerten diese Gebiete, und seitdem regenerieren sie sich, so Muller-Landau. (dl) <<

Lewis, S. et al.: Increasing carbon storage in intact African tropical forests. In: Nature 457, S. 1003-1006, 2009.



### Die Zukunft der Energie

Hrsg. v. Peter Gruss u. Ferdi Schüth BECK

ISBN: 3406576397

Dieses Buch können Sie im Science-Shop für **16,90 € (D)**, 17,40 € (A) kaufen.

[science-shop.de/artikel/957592](http://science-shop.de/artikel/957592)

5 x 5-Bewertung	
Inhalt	■ ■ ■ ■ ■
Vermittlung	■ ■ ■ ■ ■
Verständlichkeit	■ ■ ■ ■ ■
Lesespaß	■ ■ ■ ■ ■
Preis-Leistung	■ ■ ■ ■ ■
<b>Expertenwertung</b>	<b>25</b>

## REZENSION

# Wege aus der Energiekrise

Unsere Energieversorgung und der gegenwärtige Klimawandel auf unserem Planeten sind untrennbar miteinander verknüpft, und Fragen zur Energiesituation endlos – viele davon versucht das hervorragend bebilderte Buch »Die Zukunft der Energie« von Peter Gruss und Ferdi Schüth zu beantworten. Im Mittelpunkt steht dabei vor allem unsere zukünftige Versorgung mit Strom, Wärme und Antriebskraft: Ist die maximale Fördermenge an Öl (Schlagwort »Peak Oil«) schon überschritten? Funktioniert der Energiemarkt nach den Regeln von Angebot und Nachfrage wirklich? Was können alternative Energiequellen leisten? Die Internationale Energie-Agentur (IEA) – dieses Prognoseinstitut von Weltrang – veröffentlichte 2007 den World Energy Outlook: Eines der Szenarien ergibt einen Zuwachs des Energiebedarfs von 150 Prozent bis zum Jahre 2030 – fast die Hälfte davon entfällt auf die Staaten China und Indien! Wo soll dies herkommen?

»Die Zukunft der Energie« führt in den ersten Seiten sehr gut in die heutige Situation mit Erdöl und Erdgas ein. Hier wird der Unterschied zwischen Reserven (genau untersuchte und in der Höhe abgeschätzte Vorkommen) und Ressourcen (vermutete Vorkommen, deren Nutzung durch die gegenwärtigen Förderkosten im Augenblick unrentabel erscheinen lassen) erklärt, doch in Anbetracht sich rasant entwickelnder Fördertechnologien und dem vola-

tilen Marktpreis für Erdöl und Erdgas ist die Trennung dauerhaft schwer durchzuhalten. Die heute nachgewiesenen Reserven sind jedenfalls höher als je in der Geschichte des Erdöls, obwohl die Menschheit seit 1859 mehr als 1000 Milliarden Barrel verbraucht hat.

Die bei der Verbrennung dieser fossilen Brennstoffe ausgestoßenen Treibhausgase haben jedoch die Zusammensetzung der Erdatmosphäre bereits fundamental verändert. Das Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) – der Weltklimarat der Vereinten Nationen – hat daher von Wissenschaftlern erstellte Projektionen zum Klimawandel weltweit zur Verfügung gestellt und dafür 2007 den Friedensnobelpreis erhalten. Zu fundamental erscheinen die negativen Folgen des prognostizierten Klimawandels, als dass die Menschheit einfach so weiter fossile Brennstoffe verfeuern könnte.

Als Konsequenz handelte die Staatengemeinschaft das Kyoto-Abkommen zur Reduzierung der Emissionen aus. Wie eine kurze Darstellung des Abkommens von 1997 durch die Autoren aber zeigt, besitzt es fast keine Bedeutung: Es umfasst nur ein Drittel der weltweiten CO<sub>2</sub>-Emissionen, und die Minderungspflicht liegt in der Größenordnung von einem Zehntel verglichen mit den Ausgangswerten von 1990. Die unterzeichneten Staaten – vorwiegend solche mit wirtschaftlich

relativ geringem Wachstum wie Deutschland oder Großbritannien, erwirtschaften also 20 Prozent Einsparung von 30 Prozent der Kohlendioxidfreisetzung: Das sind nur sechs Prozent der Emissionen von 1990! Und wichtige Staaten wie die USA, China oder Indien sind nicht zu Einsparungen verpflichtet oder nehmen an Kyoto noch nicht teil.

Die Natur stellt uns allerdings natürliche und damit erneuerbare Energiequellen zur Verfügung: das Licht der Sonne, Wind-, Wasser- und geothermale Energie oder Einsparmöglichkeiten. Die Sorge um die Erschöpfung der weltweiten Vorräte an fossilen Brennstoffen hat dazu beigetragen, dass die Aufmerksamkeit von Politik, Wissenschaft, Industrie und Öffentlichkeit diesen neuen Technologien gegenüber geöffnet wurde. So wird die Forschung in vielen Bereichen vorangetrieben – etwa Polymere und deren Beitrag zur Energieeffizienz und energiesparenden Transport, neue Lichtquellen, erneuerbare Energien aus Mikroorganismen, die fast schon klassische Brennstoffzelltechnologie oder Wasserstoff als umweltfreundlichen Energieträger. Er könnte bis 2050 zu einem wettbewerbsfähigen Preis verfügbar sein

Breiteren Raum nimmt auch die Kernfusion ein, in dem zum Beispiel über die Fortschritte der Hochtemperatur-Plasmaphysik gesprochen wird. Das ITER-Experiment, das einzige momentan

in dieser Richtung physikalisch und technologisch Machbare, findet Erwähnung, und die Stolpersteine dieser Technologie werden aufgezeigt. So wäre die Kernfusion wohl erst 2100 eine attraktive Option.

Vielfach redet die Politik diesen Projekten auch ein Wort mit – nicht immer nur zum Guten: Einsparungsmaßnahmen werden heute meist sehr dirigistisch verbreitet und sind deshalb zum Teil auch kontraproduktiv wie der mittlerweile stark kritisierte Agrarsprit. Planwirtschaftlich ist die Klimapolitik ohnehin nicht durchzusetzen!

Eine hervorragende Sammlung weiterführender Literatur und wertvolle Kurzbiographien aller Autoren runden das Buch ab. Man wird es nicht so leicht aus der Hand legen – es macht die Systemzusammenhänge der heutigen Zeit und unsere Unbeholfenheit, mit dieser Nicht-Linearität umzugehen, deutlich. Ein Paradigmenwechsel muss deshalb stattfinden. Ein Klimaabkommen aller OECD-Staaten sowie China, Indien und Russland – und eine Verpflichtung zu massiven Emissionsreduzierungen – sollte deshalb oberste Priorität haben: Nur dies kann uns aus der gegenwärtigen Energiekrise langfristig retten. <<

### Richard Mischak

Der Rezensent ist habilitierter Mathematiker an der Fachhochschule Salzburg

The screenshot displays the 'spektrumdirekt' website interface. At the top, there's a navigation bar with 'spektrumdirekt' logo and 'premium' tag. Below it, a search bar and 'Aktuelle Wochenausgabe' section are visible. The main content area features a sidebar with 'ONLINE-LEXIKA' and a central article preview for 'Wellenkraft dümpelt beharrlich voran'. The article includes a colorful map of the world and text discussing renewable energy and climate change. A 'Science-Shop.de' logo is also present.

Mit spektrumdirekt premium haben Sie Zugriff auf alle Artikel der Online-Zeitung spektrumdirekt sowie 13 Online-Fachlexika von Spektrum Akademischer Verlag:

[www.wissenschaft-online.de/lexika](http://www.wissenschaft-online.de/lexika)

Auf Wunsch können Sie sich die Wochenausgabe im PDF-Format direkt ins Mail-Postfach schicken lassen.

Weitere Informationen finden Sie unter [www.spektrumdirekt.de/info](http://www.spektrumdirekt.de/info)

Sie möchten das Premiumangebot von spektrumdirekt zwei Wochen lang kostenlos und unverbindlich testen?

Dann schicken Sie einfach eine E-Mail mit Ihrem Namen und dem Betreff

»Premium schnuppern« an: [aboservice@wissenschaft-online.de](mailto:aboservice@wissenschaft-online.de)