Im Erdsystem zirkulieren gigantische Energiemengen: Winde wie dieser Taifun über Japan transportieren weltweit insgesamt eine Leistung von 1000 Terawatt.

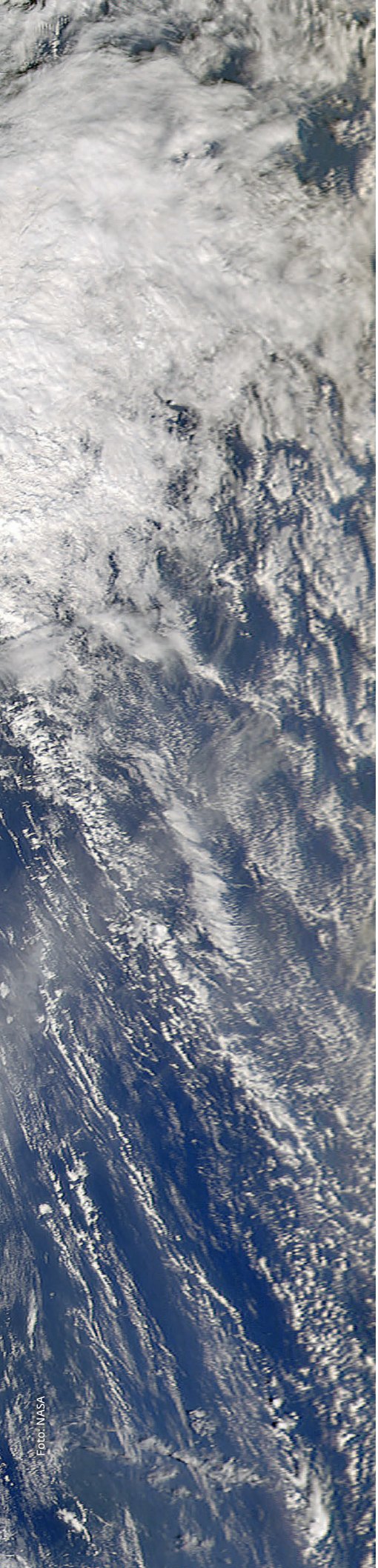


Foto: NASA

Kraftwerk **Erde**

Unser Planet arbeitet: Die Sonne treibt Wind, Wellen und den Wasserkreislauf an. Pflanzen speichern die Energie des Lichts in Zucker und liefern so den Brennstoff des Lebens. Die Geothermie knetet die Erde durch, während Mond und Sonne vor allem die Meere bewegen. **Axel Kleidon** und sein Team am **Max-Planck-Institut für Biogeochemie** in Jena untersuchen, wie viel Energie bei diesen Prozessen fließt und wie viel davon sich nachhaltig nutzen lässt, um den Energiehunger der Menschheit zu stillen.

TEXT **ROLAND WENGENMAYR**

Wer mit Axel Kleidon in seinem Büro im runden Glasturm des Max-Planck-Instituts für Biogeochemie plaudert, landet auch mal bei Aliens. Schnell taucht die Frage auf: Was würden wohl außerirdische Astronomen durch ihre Instrumente beobachten können, wenn sie diese auf die Erde richteten? Würden sie erkennen, dass auf der kleinen, blauen Murmel Leben pulsiert? Kleidon zweifelt nicht daran: „Sie müssten nur entdecken, dass in der Erdatmosphäre gleichzeitig Sauerstoff und Methan vorhanden sind."

Der britische Wissenschaftler James Lovelock hatte schon in den 1960er-Jahren die Idee, dass freier Sauerstoff in der Atmosphäre eines Planeten ein eindeutiger Fingerabdruck von Leben ist. Denn der aggressive Sauerstoff reagiert chemisch mit vielen Stoffen in der Umwelt. Dazu zählt auch das Methan, das an Luft bekanntlich sogar verbrennt. Würde das Leben auf der Erde streiken, dann würde der Sauerstoff aus unserer Luft verschwinden. Dafür läge ihr Kohlendioxidgehalt deutlich höher. Die Atmosphäre wäre dann in ein chemisches Gleichgewicht abgerutscht, in dem sich nicht mehr viel tut.

LEBEN BRINGT DIE ATMOSPHÄRE AUS DEM GLEICHGEWICHT

Eine solche Erde wäre eine leblose Einöde, wie man sie auf unseren unwirtlichen Nachbarplaneten findet. Sowohl die dünne, kalte Atmosphäre um den Mars wie auch die drückende Treibhaushölle auf der Venus bestehen fast nur aus Kohlendioxid. Dieses Gas ist chemisch so träge, dass die Zusammensetzung einer solchen Atmosphäre sich kaum verändert. Jedenfalls nicht ohne Leben.

„Charakteristisch für Leben ist also, dass sich die chemische Zusammensetzung der Atmosphäre nicht im Gleichgewicht befindet", sagt Kleidon. Die

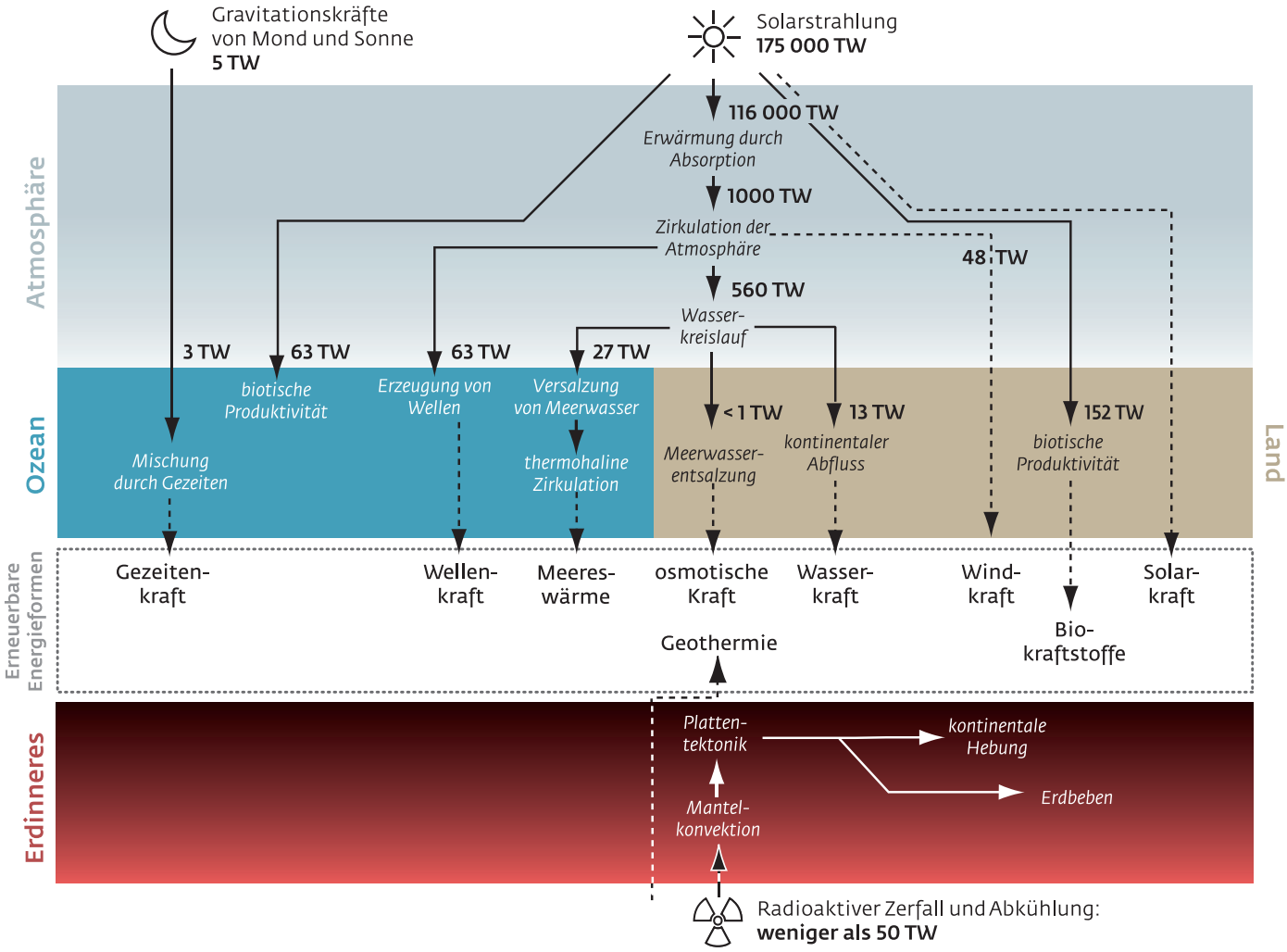
Pflanzen kurbeln per Fotosynthese permanent einen globalen Stoffkreislauf an. Er hält den Sauerstoffgehalt unserer Luft stabil auf 21 Prozent und entfernt aus ihr überschüssiges Kohlendioxid.

DIE BIOLOGIE BEEINFLUSST GEOCHEMIE UND GEOLOGIE

Auch die Oberfläche der Erde gestaltet das Leben massiv um. Kleidon deutet durch das Fenster auf die hügelige Landschaft: „Das ist der berühmte Jenaer Muschelkalk, der aus biologischer Produktion stammt und eine ganze Menge Kohlendioxid gespeichert hat.“ Die fossilen Tiere haben hier in einem Urozean in Millionen von Jahren eine mächtige Kalksteinschicht geschaffen. Das geschah in einer Nahrungskette, an deren Anfang Algen – also wieder Pflanzen – standen. Dieser gigantische Umbau ganzer Landschaften durch das Leben setzt sich bis heute fort.

Die Biologie bestimmt äußerst aktiv und unübersehbar die Chemie und die Geologie unseres Planeten. Auch der Name von Kleidons Fachgebiet, der Biogeochemie, spiegelt wider, dass im Raumschiff Erde lebende und tote Materie eng miteinander verknüpft sind. Allerdings buddelt sein Team nicht etwa im prähistorischen Meeresboden der Umgebung, sondern eher in Datenminen von Computern. Axel Kleidon ist Theoretiker und erforscht mit seiner Max-Planck-Nachwuchsgruppe das komplette „Erdsystem“.

Darunter verstehen die Forscher die Gesamtheit aller wichtigen klimatischen, geologischen und biologischen Prozesse, also alle wesentlichen Kreisläufe in der Atmosphäre, auf der Erdoberfläche und unter dem Erdboden. Diese Kreisläufe, zu denen auch die fotosynthetische Biomasseproduktion zählt, sind eng miteinander verknüpft. Kleidon interessiert vor allem, welche Energie diese Prozesse antreibt und aus welchen wesentlichen Quellen diese Antriebsenergie stammt.



Das Erdsystem aus energetischer Sicht: Die Sonne strahlt 175 000 Terawatt (TW) auf die Erde, die Erdwärme liefert 50 Terawatt, die Gravitation von Mond und Sonne fünf. Die Grafik veranschaulicht, welche Prozesse die Energie antreibt und wie sich die Energieflüsse nutzen lassen.

Grafik: MPI für Biogeochemie

Die Jenaer Wissenschaftler nutzen auch die komplexen Modelle der Klimaforschung. Doch Axel Kleidon liebt es nach eigenem Bekunden, die wesentlichen Prozesse, die in den komplexen Simulationen berücksichtigt werden, in simplen Modellen zu erfassen. Für sie benötigt er nur Stift und Papier – oder die Tafel.

Vielleicht rührt sein Hang zu einfachen, aber überraschenden und tief gehenden Überlegungen auch daher, dass er profunden Einblick in mehrere wissenschaftliche Disziplinen hat. Er hat in Hamburg und später an der Purdue University im amerikanischen Bundesstaat Indiana Physik studiert – und gleich noch Mathematik und Meteorologie dazu. Nach einigen Jahren als Wissenschaftler an der Stanford University und der University of Maryland in den USA kam er 2006 nach Jena.

DIE ERDE ÄHNELT EINER WÄRMEKRAFTMASCHINE

Wenn der Max-Planck-Forscher erklärt, wie er das Erdsystem im Großen versteht, drängt sich unweigerlich eine berühmte Filmszene auf. Es ist die Einführung des Physiklehrers Bömmel im Filmklassiker *Die Feuerzangenbowle* in die Funktionsweise der „Dampfmaschin". Die Frage, ob er die Erde auch als Dampfmaschine betrachte, bringt Kleidon zum Lachen. Er stimmt zu, präzisiert jedoch, dass er das Erdsystem als sogenannte Wärmekraftmaschine – den allgemeinen Fall von Dampfmaschine und Verbrennungsmotor – behandle.

Das ist nicht seine einzige Betrachtungsweise der Erde, sie liefert aber verblüffende Resultate. Bei der Erklärung, warum das eine wissenschaftlich solide Vorgehensweise sei, geraten wir auf eine ausgedehnte Gedankenreise. Sie führt uns von der Strahlung der Sonne bis ins Spielzimmer von Kleidons Sohn. Schließlich landen wir bei der Frage, wie viel erneuerbare Energie das Erdsystem nachhaltig hergeben kann.

Den Anfang macht die Sonne. Ihre Strahlung ist die Hauptenergiequelle der Erde, deren Gesamtleistung sich auf gigantische 175 000 Terawatt summiert. Ein Terawatt sind 1000 Milliarden Watt. Die Wärme, die aus dem Erdinnern aufsteigt und immerhin ganze Kontinentalplatten bewegt, diese mit Erdbeben erschüttert und Vulkane ausbrechen lässt, liefert als zweitstärkster Antrieb des Erdsystems nur etwa den 3500sten Teil an Energie: Sie speist sich aus dem Zerfall natürlicher radioaktiver Elemente und dem langsamen Auskühlen und Erstarren des flüssigen Erdkerns und liefert rund 50 Terawatt.

Hier lohnt sich ein Vergleich mit dem permanenten Fluss an Primärenergie, den die gesamte Menschheit konsumiert. „Er liegt derzeit bei ungefähr 16 Terawatt", sagt Alex Kleidon. Für das ständige Umkneten braucht die Erde grob also nur dreimal so viel Leistung, wie die Menschheit heute – in anderen Formen – als Primärenergie konsumiert. Im Gespräch mit Kleidon bekommt man ein völlig neues Gefühl für den Energiehunger unserer Spezies.

Eine weitere Energiequelle sind die Gezeiten. Wenn Mond und Sonne an der Erde zerren, pumpen sie über ihre Gravitationskraft Energie in unseren Planeten, wenn auch relativ wenig. Sie entspricht einer permanenten Leistung von fünf Terawatt.

Betrachtet man die Erde als „Dampfmaschin" – oder präziser als Wärmekraftmaschine –, kann man Erdwärme und Gezeiten getrost vernachlässigen. So bleibt als Hauptantrieb des Erdsystems eine reine Strahlungsbilanz übrig. Auf der einen Seite der Bilanz steht die Strahlung von der Sonne, auf der anderen Seite die Rückstrahlung der Erde ins Weltall. Diese entsorgt am Schluss wieder die solare Energie.

Beide Energiemengen müssen sich die Waage halten, sonst würde unser Planet entweder immer wärmer oder immer kälter werden. Moment mal, denkt man hier als Laie: Das Erdsystem verbraucht doch Energie? Der Wind, die Wellen, der Wasserkreislauf, die Pflanzen – alle werden letztlich vom Sonnenlicht angetrieben und nehmen sich ein Stück vom solaren Energiekuchen. Also müsste die Erde doch mehr Energie aufnehmen als abgeben? Irrtum! Alle Spieler im Erdsystem wandeln die durchfließende Energie permanent nur von einer Form in eine andere um. Die gesamte Energiemenge bleibt konstant. Am Ende der komplexen Kette bleibt reine Wärmeenergie. Und diese strahlt die Erde wie ein Motorkühler wieder ins All ab.

Betrachtet die Erde aus ungewöhnlicher Perspektive: Axel Kleidon untersucht die Energieflüsse im Erdsystem.

Für den Antrieb des Erdsystems sorgt mithin die Umwandlung der solaren Strahlungsenergie in andere Energieformen. Sie trifft als relativ kurzwellige Strahlung auf die Erde, die der Temperatur der Sonnenoberfläche von rund 5500 Grad Celsius entspricht. Wesentlich langwelliger und kälter ist dagegen die Rückstrahlung von der Erde ins All: minus 18 Grad. Dazwischen hat die Sonnenenergie das Leben auf der Erde über die Fotosynthese angekurbelt – wie ein komplexes Getriebe, das gewissermaßen Temperaturgänge herunterschaltet.

Und genau deshalb passt das Bild der Wärmekraftmaschine so gut. Eine Dampflok hat ebenfalls eine heiße Energiequelle, nämlich das Feuer im Kessel, das Wasserdampf erzeugt. Dieser verrichtet mechanische Arbeit, muss dafür aber am Schluss gekühlt und wieder zu Wasser auskondensiert werden. Der Kühlprozess entspricht dem Abstrahlen der Erde ins All. Um arbeiten

Foto: MPI für Biogeochemie - Rudolf K. Wernicke

Besonders sinnvoll ist es, Sonnenenergie in Wüsten zu sammeln. Das Ivanpah-Kraftwerk (oben), das hier als Modell dargestellt ist und in der kalifornischen Mojave-Wüste entsteht, soll ab 2013 fast 400 Megawatt liefern. Vielerorts, etwa auf dem Solarfeld Erlasee in Franken (rechts), konkurriert die Fotovoltaik jedoch mit der Fotosynthese, die mit Sonnenlicht Biomasse produziert.

zu können, brauchen alle Wärmekraftmaschinen ein heißes Reservoir zur Energiezufuhr und ein kaltes Reservoir zur Entsorgung der Abwärme. Das gilt für Verbrennungsmotoren wie für Kraftwerksturbinen.

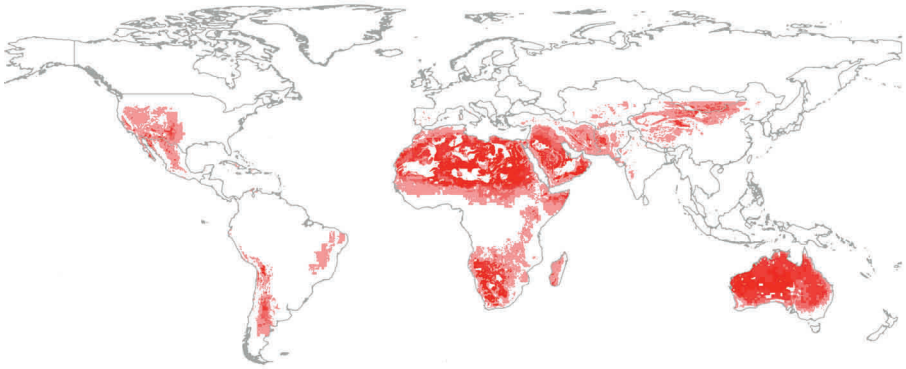
DAS ERDSYSTEM KANN NICHT RÜCKWÄRTS LAUFEN

Und selbst die Arbeit, die diese Maschinen leisten, wandelt sich schlussendlich in Wärme um. Wenn wir mit dem Auto von zu Hause in den Urlaub und wieder zurück gefahren sind, hat sich die chemische Energie des dabei verbrauchten Kraftstoffs über die allgegenwärtige Reibung in reine Abwärme verwandelt. Die technisch nicht nutzbare Wärme ist ohnehin in die Umwelt abgeflossen.

Diese Erkenntnis aus der Welt der aufkommenden Dampfmaschinen hat im 19. Jahrhundert die Lehre der Thermodynamik hervorgebracht. Was mit Technik begann, wurde ein Gebiet der Physik, das auch für das Erdsystem eine fundamentale Bedeutung hat. Erst die Gesetze der Thermodynamik nämlich geben physikalischen Prozessen eine Zeitrichtung.

„Deshalb kann das Erdsystem nicht wie ein Film einfach rückwärts laufen", erklärt Axel Kleidon, „also kalte, langwellige Strahlung aus allen Richtungen aus dem Weltall aufnehmen und heiße, kurzwellige Strahlung gebündelt zur Sonne abstrahlen." Das muss der Gast erst mal verdauen – zumal der Wissenschaftler nun auf einen Begriff zusteuert, mit dem auch viele Physikstudenten anfangs kämpfen: Entropie.

Zum Glück können wir alle das Wesen der Entropie doch anschaulich verstehen, weil wir im Alltag mit ihr permanent ringen. Dazu gehört auch Axel Kleidons Sohn. Er spielt gern Lego und macht tagtäglich eine fundamentale Er-



Regionen in der Welt, in denen die Desertec-Initiative die fotovoltaische Stromerzeugung für sinnvoll hält.

Grafik: Bright Source Energy (oben), Desertec Foundation, www.desertec.org

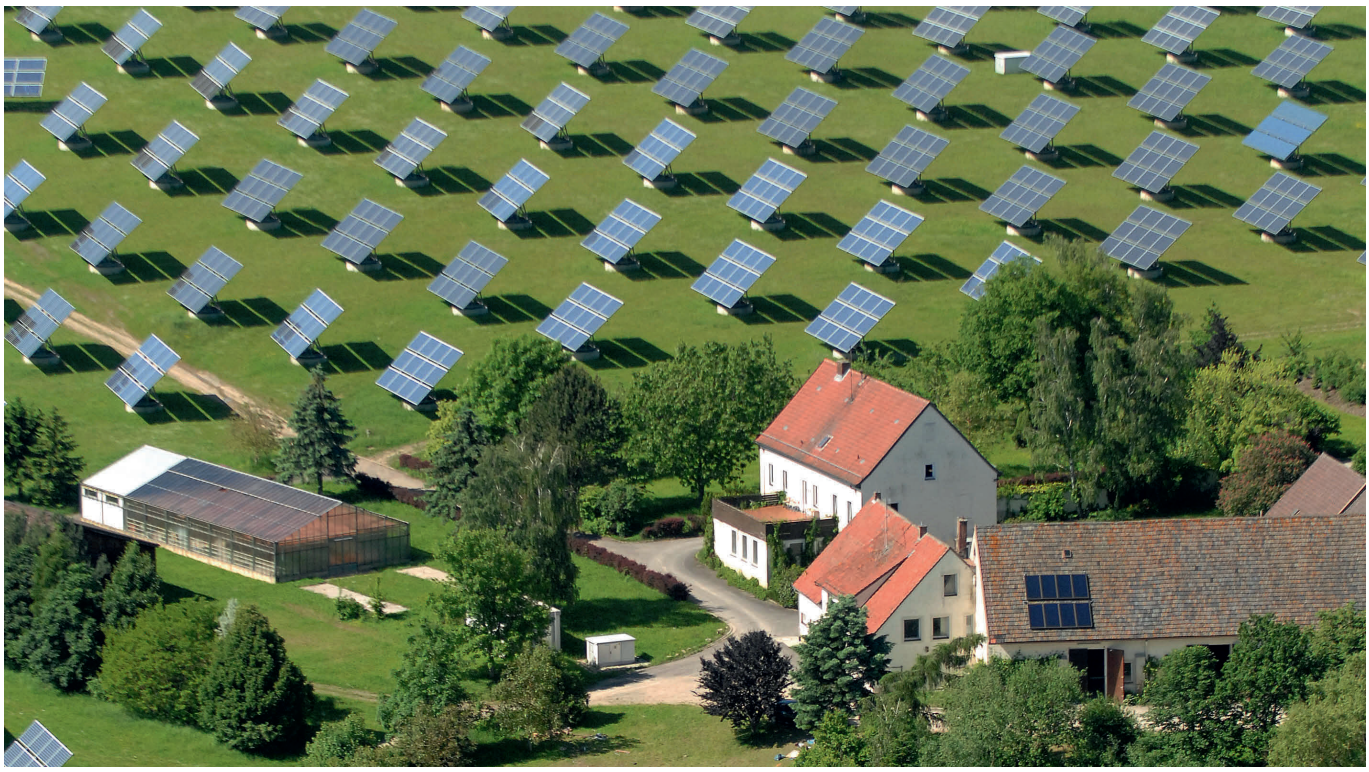


Foto: dpa – picture alliance

fahrung, die wir alle kennen: Die schön in Kästen sortierten Bausteine verteilen sich wie von selbst über das ganze Zimmer. „Das passiert nicht nur räumlich, sodass die Steine schließlich überall unter den Fußsohlen kneifen“, sagt Kleidon. „Auch die schöne Sortierung der Steine nach ihren Farben verwandelt sich in eine bunte Mischung.“

Im Kinderzimmer entfaltet also eine geheimnisvolle Kraft ihre Wirkung, die – aus menschlicher Sicht – von schöner Ordnung zu unschöner Unordnung strebt. Das ist nichts anderes als die Entropie, die mit der vermeintlichen Unordnung wächst. Und wachsen will sie permanent.

Warum ist das so? Das versteht man, wenn man das allgegenwärtige Phänomen aus Sicht der Statistischen Physik angeht – das moderne Kind der Thermodynamik. Statistisch betrachtet ist das aufgeräumte Zimmer, in dem die Legosteine sauber nach Farbe in Kästen einsortiert sind, nur ein Zustand unter extrem vielen gleichwertigen. Jeder dieser Zustände repräsentiert eine andere Legoverteilung über das Zimmer.

Dieses Bild macht klar, dass der aufgeräumte Zustand ziemlich unwahrscheinlich ist. Hätte Kleidons Sohn zum Legospielen einige zig Milliarden Jahre Zeit, dann würde dieser Zustand auch mal rein zufällig eintreten. Das zumindest sagt die statistische Betrachtung. Da der Sohn aber so viel Lebenszeit nicht hat, muss er aktiv aufräumen. „Und dieses räumliche Konzentrieren und Sortieren bedarf der Arbeit“, sagt Kleidon. Das gilt nicht nur für Lego, sondern ganz allgemein.

DIE SONNE STRAHLT GEORDNET, DIE ERDE UNGEORDNET

Lego eignet sich also wunderbar, um die Natur der Entropie zu begreifen. Die Gesetze der Thermodynamik besagen, dass die Entropie alle natürlichen Systeme in Richtung maximaler Unordnung treibt. Wie immer ist auch hier Widerstand gegen das Gesetz durchaus möglich. Das Leben leistet ihn, indem es unter Einsatz von Energie geordnete Strukturen herstellt: Das fotosynthetische Reaktionszentrum in Pflanzenzellen etwa ist ein hoch geordnetes molekulares Lego, das Sonnenlicht sammelt, um daraus verwertbare Energie in Form von Zucker herzustellen.

Doch der Gesetzesbruch, der im Endeffekt gar keiner ist, hat seinen Preis: Anderswo muss zum Ausgleich unweigerlich die Entropie anwachsen. Diesen Überschuss an Entropie deponiert die Erde einfach im Weltall.

Axel Kleidon erklärt den Exportmechanismus so: „Die Strahlung von der Sonne ist hoch geordnet im Vergleich zur Strahlung von der Erde.“ Die solare Strahlung ist sogar in zweifacher Hinsicht schön sortiert. Zum einen kommen alle solaren Lichtquanten räumlich sauber geordnet aus einer Richtung, eben von der Sonne. Die Erde strahlt dagegen diffus in alle Richtungen ab, also räumlich wesentlich ungeordneter. Zum anderen besteht die Solarstrahlung aus vergleichsweise wenigen Lichtquanten, die relativ viel Energie in sich tragen.

Die kühle Rückstrahlung der Erde ins All dagegen enthält viel mehr Lichtquanten, die relativ energiearm sind. Im Legobild kann man sich das hilfsweise so vorstellen: Während die Lichtquanten von der Sonne zusammengebauten Legoautos entsprechen, repräsentieren deren kaputt gespielte Trümmer aus Einzelsteinen die Strah-

Über Land lassen sich nur etwa fünf Terawatt der Windenergie nachhaltig nutzen. Windparks im Meer könnten dieses Potenzial erhöhen, nicht zuletzt deshalb, weil der bodennahe Wind über den Ozeanen etwa 375 Terawatt in sich trägt und an Land nur 125 Terawatt, von denen nur ein Teil für die Energiegewinnung zur Verfügung steht.

lung von der Erde als Endzustand. Kleidons Fazit: „Das Erdsystem gewinnt seinen Antrieb daraus, dass es die Entropie der Strahlung erhöht."

NUR EIN KLEINER TEIL DER WINDENERGIE IST NUTZBAR

Die Sonnenstrahlung treibt auf der Erde eine Hierarchie vieler Kreisläufe an. Sie wärmt zum Beispiel die Erdoberfläche an Land auf, und diese erhitzt wiederum wie eine Herdplatte die Luftschicht darüber. Die bodennahe Warmluft steigt nun wie ein Heißluftballon auf, nimmt Feuchtigkeit mit hinauf auf Wolkenhöhe. Dafür sinkt Kaltluft zum Boden hinunter, um sich dort zu erwärmen. Läuft dieses Konvektionskarussell am Tag, kurbelt es den globalen Wind- und Wasserkreislauf im Wettersystem an.

Die Jenaer Forscher können diese wesentlichen, großen Kreisläufe im Erdsystem modellieren und realistisch abschätzen, wie viel von der solaren Leistung in jeden Kreislauf fließt. Aus den Ergebnissen können sie sehr konkrete, verblüffende Schlüsse ziehen. Das betrifft auch die Frage, wie viel Leistung wir in Form erneuerbarer Energie aus dem Erdsystem abzapfen können, ohne es nachhaltig zu verändern.

Ein Beispiel ist die Nutzung der Windenergie über Land. Sie steht am Ende einer Kette, die mit 1000 Terawatt beginnt. So viel Leistung fließt durch die solare Erwärmung in die globale Erzeugung von Wind. Etwa die Hälfte davon trägt der Wind nahe der Erdoberfläche in sich, ist also für Windkraftanlagen erreichbar. Da die Landflächen kleiner als die Ozeanflächen sind, bleiben davon 125 Terawatt übrig. Turbulenzen in der Atmosphäre, also schlicht Reibung in der Luft, fressen davon allerdings nochmals 77 Terawatt weg. So bleiben rund 50 Terawatt an Windleistung übrig, die im Prinzip über Land technisch nutzbar ist.

Würde man diese Leistung jedoch voll ausschöpfen, käme die weltweite Wettermaschine ins Stottern. Nachhaltig nutzen ließen sich maximal zehn Prozent davon, schätzt Axel Kleidon. Diese fünf Terawatt entsprächen demnach knapp einem Drittel des gesamten Energiebedarfs der Menschheit.

Foto: istockphoto

Kleidons gute Nachricht ist, dass wir die Windenergienutzung an Land – und offshore – im Vergleich zu heute noch kräftig ausbauen können. Sie unterliegt aber überraschend engen natürlichen Grenzen. So berechneten die Jenaer Forscher kürzlich, dass die schnellen Strahlströme des Windes in der oberen Atmosphäre etwa 200-mal weniger Energie hergäben – wenn man sie bereits nutzen könnte –, als bisher gedacht. Damit platzt manch hochfliegende Vision schwebender Windenergieparks in der Stratosphäre.

Solarenergie ist dagegen im Überfluss vorhanden. Das betrifft die Produktion von Solarstrom ebenso wie von Nahrung, die ja auch umgewandelte Solarenergie ist. „Deshalb bringt es aber auch in der Gesamtbilanz nichts, bestehende Äcker einfach in Solarparks umzuwandeln“, erklärt der Wissenschaftler. Dafür müssen unproduktive Wüstenböden, die derzeit Solarstrahlung ungenutzt in Abwärme verwandeln, urbar gemacht werden. Die Desertec-Initiative, die im großen Stil Solarkraftwerke in der Sahara plant, geht also grundsätzlich in die richtige Richtung.

200 TERAWATT LEISTUNG BRINGT FOTOSYNTHESE WELTWEIT

Nach Kleidons Erkenntnis kann die Menschheit also die Gesamtleistung des Erdsystems nachhaltig steigern, wenn sie Sonnenenergie intelligent nutzt. Sie könnte so die Erde regelrecht bewirtschaften und eine Revolution wie durch die Erfindung des Ackerbaus einläuten.

Das Leben selbst tut dies bereits seit vielen Millionen Jahren – und zwar massiv. Das verraten die Zahlen in Kleidons Leistungsschau. Die Fotosynthese bringt es im globalen Erdsystem auf eine gigantische Leistung von mehr als 200 Terawatt. Das ist grob viermal so viel wie der Beitrag der Erdwärme und mehr als zwölfmal so viel wie unser globaler Konsum an Primärenergie.

Vom Weltraum aus gesehen verrät sich diese Produktivität des Lebens nicht nur in der Grünfärbung von Landstrichen. Auch die relativ kleinräumigen Wolkenformationen seien letztlich ein deutlicher Fingerabdruck pflanzlicher Aktivität auf der Erde, gibt Kleidon zu bedenken. Urwälder wie der Amazonas etwa beeinflussen massiv das lokale Wetter und damit die Wolkenstrukturen in einem recht eng umgrenzten Gebiet, wie es selbst der Amazonas im globalen Maßstab darstellt.

MIT TIEFEN WURZELN KÜHLEN PFLANZEN DAS KLIMA STÄRKER

Die Vegetation des Amazonas brachte Kleidon sogar zu seinem Forschungsgebiet. „Auf der Südhalbkugel gibt es in den Tropen eine ausgeprägte Trockenzeit“, erklärt er. Und doch wird es im Amazonasbecken nie so heiß, wie es die Klimamodelle zu Kleidons Zeit als Doktorand fälschlicherweise errechneten. Ein Artikel im Fachblatt Nature über die tiefen Wurzeln der Urwaldbäume im Amazonas brachte Kleidon auf eine Idee, wo der Fehler liegen könnte. Er entwarf ein „geerdetes“ Klimamodell, das die Wurzelsysteme der Bäume berücksichtigte.

Tief reichende Wurzeln erlauben es den Pflanzen, in der Trockenzeit mehr von dem Wasserüberschuss anzuzapfen, der aus der Regenzeit im Boden gespeichert ist. So können die Bäume auch in der Trockenzeit viel Wasser verdampfen. Tatsächlich simulierte das neue Modell nun ein viel kühleres Klima, das der Realität im Amazonas nahe kam. „Der Effekt war gewaltig“, freut sich Kleidon noch heute.

Als Ergebnis dieser pflanzlichen Aktivität entstehen über solchen Urwäldern regelrechte Wolkenpilze, etwa Gewitterzellen. Auf Venus und Mars fehlen solche scharf abgegrenzten Wolkenstrukturen. Außerirdische Astronomen könnten das pralle Leben auf dem Raumschiff Erde also an vielen Indizien dingfest machen. ◂

AUF DEN PUNKT GEBRACHT

- **Auf der Erde werden verschiedene Formen der Energie ständig ineinander umgewandelt. Dabei gibt unser Planet genauso viel Energie in Form von Strahlung ab, wie er aufnimmt.**
- **Die Entropie der abgegebenen Strahlung ist wesentlich größer als die der aufgenommenen. Denn die Erde strahlt in alle Richtungen Wärme ab und sendet viel mehr Lichtquanten aus, als sie empfängt; die Energie der einzelnen Lichtquanten ist dafür niedriger.**
- **Vom Wind über Land lassen sich nur etwa fünf Terawatt ohne gravierende Nebeneffekte nutzen – das entspricht einem Zehntel der verfügbaren Windenergie und einem knappen Drittel des derzeitigen Bedarfs der Menschheit an Primärenergie.**
- **Sonnenenergie kann den Energiebedarf der Menschheit decken, Solarkraftwerke werden jedoch sinnvollerweise in Wüsten errichtet, wo keine Pflanzen die Lichtenergie bereits nutzen.**

GLOSSAR

Entropie: Sie ergibt sich aus der Zahl der Zustände, die ein System bei gleichem Energieinhalt einnehmen kann. Da es immer viel mehr energetisch gleichwertige ungeordnete als geordnete Zustände gibt, ist die Entropie ungeordneter Zustände größer als die geordneter. Die Entropie wird daher anschaulich oft als Maß der Unordnung bezeichnet. Prozesse laufen nur spontan ab, wenn sich dabei die Entropie des gesamten Systems erhöht. Schließlich wird Entropie auch als Maß für die Qualität von Energie aufgefasst. Dabei bedeutet Energie mit hoher Qualität, dass mit ihr Arbeit verrichtet werden kann.

Erdsystem: In diesem Konzept wird die Erde als System betrachtet, in dem Atmosphäre, Gewässer, Eis, Boden und Gestein sowie die Lebewesen auf vielfältige Weise miteinander wechselwirken.

Fotosynthese: Sie wandelt Lichtenergie in chemische Energie um. Pflanzen, Bakterien und Algen produzieren in diesem Prozess unter anderem Zucker aus Kohlendioxid und Wasser und geben dabei Sauerstoff ab.

Thermodynamik: Sie beschäftigt sich mit den möglichen Energieumwandlungen. Mit ihr lässt sich etwa ermitteln, wie viel Arbeit ein System leisten kann, wenn Energie von einer Form in eine andere überführt wird.