

Die Sonne als Wandelstern

Die Sonne ist der wichtigste Energiespender der Erde und Motor des Klimas. Doch sie schickt mal mehr, mal weniger Licht zur Erde. Astronomen um **Natalie Krivova** erfassen am **Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung** in Göttingen diese Schwankungen der Sonnenstrahlung in Modellen, um herauszufinden, ob die Veränderungen zur Erderwärmung beitragen oder ob sie ihr entgegenwirken.

TEXT **TIM SCHRÖDER**

Für meine Arbeit brauche ich eigentlich nur zwei Dinge“, sagt Natalie Krivova und lacht, „einen Computer und Zeit.“ Das ist erstaunlich, denn Natalie Krivova ist Astronomin und befasst sich mit jenem Himmelskörper, der für das Leben auf der Erde am wichtigsten ist – der Sonne. „Trotzdem habe ich bislang nur selten durch ein Teleskop geschaut.“ Die Wissenschaftlerin arbeitet in einem kleinen Büro im Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung in Göttingen. An der Wand hängt eine weiße Schreibtafel. Krivova hat mit grünem Filzstift eine lachende Sonne in die Ecke gemalt. Die Sonne ist ihre Passion.

Naturforscher beobachten den Stern schon seit 400 Jahren, seit Galileo Galilei das erste leistungsfähige Fernrohr entwickelte. Seitdem hat die Menschheit viel über den gigantischen, heißen Gasballon gelernt. Doch manche Details sind noch unklar. Früher nahmen Forscher an, dass die Sonne stets gleich stark strahle, und ersannen dafür den Begriff der Solarkonstante. Doch inzwi-

schen wissen sie es besser: Die Strahlungsstärke der Sonne schwankt – und das ist für den Planeten Erde von Bedeutung. Denn das irdische Leben ist von der Sonnenstrahlung abhängig.

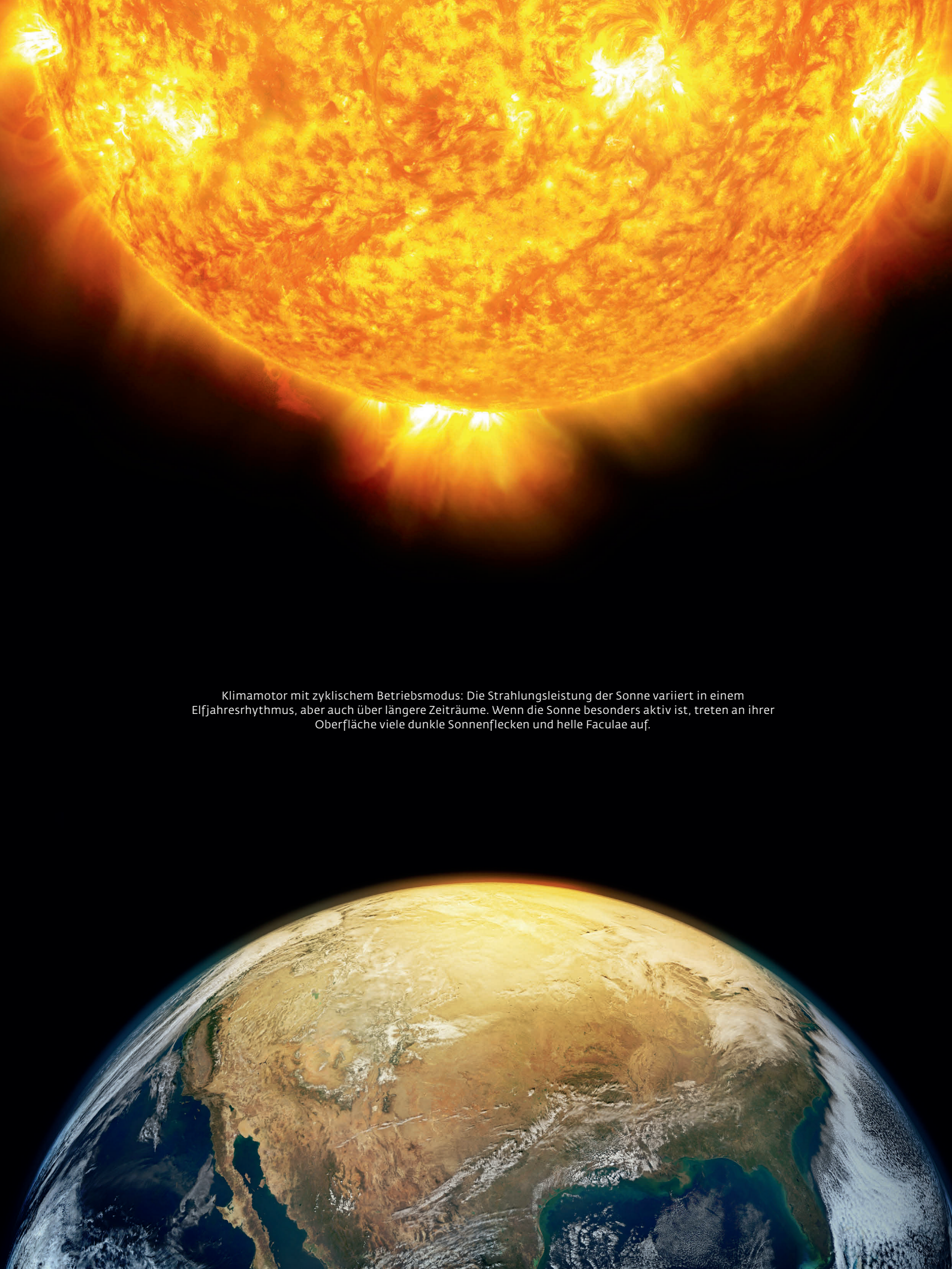
Und mit der Diskussion um den Klimawandel hat das Thema Sonnenstrahlung in den vergangenen Jahren zusätzlich an Bedeutung gewonnen. Die Frage ist, ob auch die Sonne einen Anteil an der langsamen Erderwärmung hat – und falls ja, wie groß dieser ist – oder ob eine nachlassende Sonnenaktivität dem vom Menschen verursachten Klimawandel sogar entgegenwirkt.

KLIMAMODELLE MÜSSEN DIE SONNENAKTIVITÄT MITRECHNEN

Natalie Krivova und ihre Mitarbeiter wollen helfen, diese Frage zu beantworten. Sie haben an ihren Computern physikalische Rechenmodelle entwickelt, die die Veränderungen der Sonnenaktivität über viele Jahrhunderte simulieren. Das ist für Klimaforscher essenziell wichtig: „Wenn ich herausfinden will, wie stark sich das Klima

durch den Ausstoß von Treibhausgasen verändert, dann muss ich natürlich auch alle anderen Einflüsse richtig abschätzen können“, sagt Krivova. „Und die Sonne ist als Hauptenergielieferant der Erde nun einmal die wichtigste Einflussgröße.“ Kein Klimamodell könne zuverlässige Daten liefern, wenn die Sonnenaktivität nicht richtig mitgerechnet wird, sagt sie.

Natürlich kennen Wissenschaftler heute die wichtigsten Größen der Sonnenaktivität. Dort, wo das Sonnenlicht senkrecht einfällt, trifft auf einen Quadratmeter Erdatmosphäre eine Leistung von rund 1360 Watt. Dieser über alle Wellenlängen des Lichts, von Ultraviolett bis Infrarot, aufsummierte Wert heißt Total Solar Irradiance (TSI, Leistungsdichte der gesamten Sonneneinstrahlung). Wie viel Energie auf der Erdoberfläche – auf den Kontinenten und der Meeresoberfläche – ankommt, hängt aber von der Wellenlänge des Sonnenlichts ab. So wird ultraviolettes Licht in den oberen Schichten der Atmosphäre fast gänzlich ausgebremsst. Daher ist es wichtig, Wellenlängen einzeln zu betrachten. >



Klimamotor mit zyklischem Betriebsmodus: Die Strahlungsleistung der Sonne variiert in einem Elfmjahresrhythmus, aber auch über längere Zeiträume. Wenn die Sonne besonders aktiv ist, treten an ihrer Oberfläche viele dunkle Sonnenflecken und helle Faculae auf.



Am Puls der Sonne: Theodosios Chatzistergos, Natalie Krivova, Kok Leng Yeo und Alexander Shapiro (von links) erfassen die Schwankungen der solaren Strahlungsleistung in Modellen, die in Klimasimulationen berücksichtigt werden.

Die Intensität der Sonnenstrahlung schwankt in einem etwa elfjährigen Rhythmus. Dieses Auf und Ab fällt zusammen mit dem vermehrten Auftreten und Verschwinden von Sonnenflecken – dunkler Flächen auf der Sonne. Die größten von ihnen sind mit bloßem Auge von der Erde aus erkennbar.

Schon chinesische Naturforscher hatten vor Jahrhunderten Sonnenflecken beschrieben. Der deutsche Apotheker und Hobbyastronom Samuel Heinrich Schwabe war der Erste, der sie ab 1843 systematisch erfasste. Doch erst als die Menschen in den 1970er-Jahren Satelliten mit Messgeräten ins All schossen,

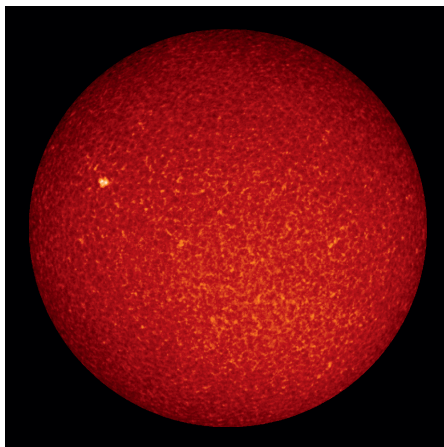
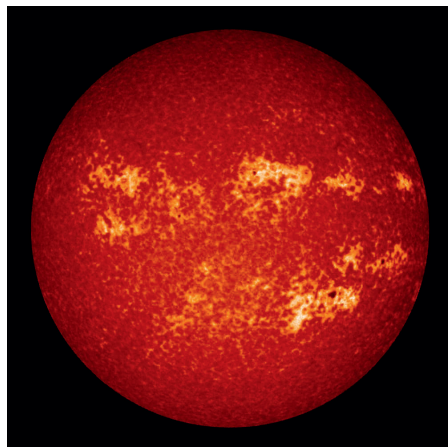
erkannten Astronomen, dass sich mit dem Zyklus der Sonnenflecken auch die Strahlungsleistung der Sonne ändert.

Auf der Höhe des Elfjahreszyklus, wenn besonders viele Sonnenflecken zu sehen sind, ist die Sonnenstrahlung am stärksten. Heute weiß man, dass die TSI in dieser Phase um etwa ein Watt zunimmt. Während des Sonnenfleckenminimums wiederum sind dann kaum noch Flecken zu sehen. Die Leistung nimmt in dieser Zeit ab.

LANGFRISTIGE TRENDS NEBEN DEM ELFJAHRESZYKLUS

Ein Watt – das klingt vernachlässigbar. Doch offenbar sind die Auswirkungen für die Erde beträchtlich. Im 17. Jahrhundert gab es in Europa eine besonders kalte Periode, die man heute als die Kleine Eiszeit bezeichnet. Berühmt sind die Bilder mit Winterstimmungen des niederländischen Malers Hendrick Avercamp – Eisläufer, tief verschneite Dörfer. Zu jener Zeit froren die Flüsse bis weit ins Frühjahr hinein zu. In den Bergen schmolz der Schnee noch nicht einmal im Sommer. In historischen astronomi-

Die Sonne auf dem Höhepunkt (links) und am Tiefpunkt ihrer Aktivität: Das Kodaikanal Observatory in Indien hat unseren Stern in den Jahren 1928 (links) und 1933 fotografiert. Die Aufnahmen zeigen die Intensität im Calcium-II-Band des optischen Spektrums.



» Im Vergleich mit den Modellen anderer Forschergruppen hat sich Krivovas Simulationswerkzeug als sehr zuverlässig erwiesen.

schen Aufzeichnungen werden für diesen Zeitraum kaum Sonnenflecken erwähnt. Entsprechend dürfte die Sonnenaktivität damals während mehrerer Jahrzehnte sehr gering gewesen sein.

Es gibt also nicht nur den Elfbjahreszyklus, sondern auch einen langfristigen Trend, der das Klima auf der Erde in größeren Zeiträumen verändert. So haben Astronomen Hinweise darauf gefunden, dass die Sonnenstrahlung im Laufe der vergangenen 300 bis 400 Jahre langfristig um rund ein Watt zugenommen haben könnte. Den genauen Wert kennt man bislang aber nicht.

Interessanterweise schwankt die Sonnenstrahlung während des Sonnenzyklus nicht über das ganze Spektrum des Sonnenlichts gleich stark. So beruhen über 50 Prozent der Schwankung in der Strahlungsleistung auf Veränderungen im ultravioletten Licht. Und das wurde lange Zeit in Sonnen- und Klimamodellen nicht berücksichtigt.

Die ultraviolette Strahlung reagiert in der Atmosphäre mit Ozonmolekülen und steuert so das Ozongleichgewicht. Außerdem reagiert sie mit Stickstoff und vielen anderen Molekülen. „Wie sich diese Reaktionen im Verlauf des Sonnenzyklus ändern, wissen wir nicht genau“, sagt Natalie Krivova. „Es gibt aber Hinweise darauf, dass in der Atmo-

sphäre Reaktionen ablaufen, die die Wirkung der Strahlungsintensität noch verstärken“, sagt Krivova.

Daher berücksichtigt Krivovas Modell SATIRE (Spectral And Total Irradiance REconstructions) auch die Schwankungen des UV-Lichts. „Zwar hat das UV-Licht nur einen Anteil von acht Prozent an der gesamten Sonnenstrahlung“, sagt sie. „Aber die Schwankungen sind erheblich, und wenn sich der Effekt der UV-Strahlung in der Atmosphäre verstärkt, müssen wir sie in unseren Modellen entsprechend stärker berücksichtigen.“

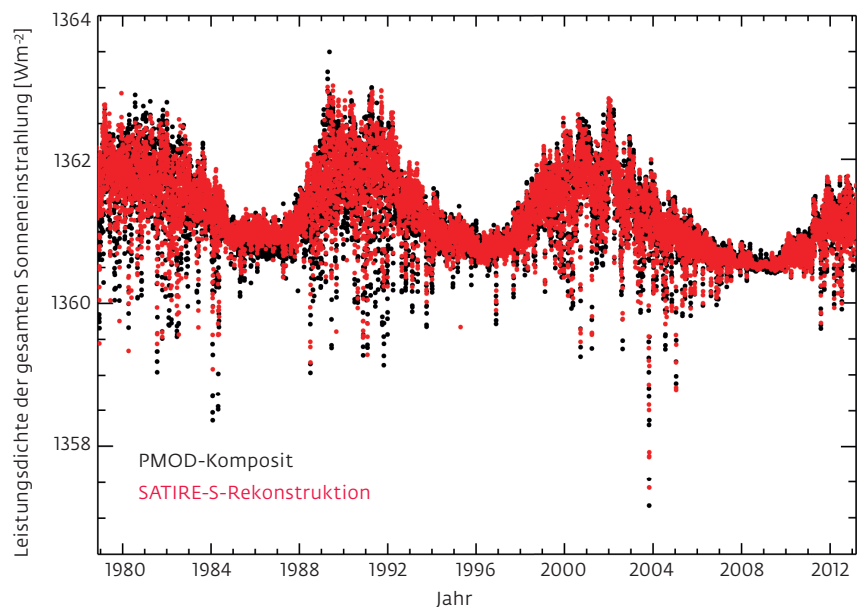
Damit die Modelle, die natürliche Phänomene wie den Klimawandel oder die Sonnenstrahlung beschreiben, die Realität richtig wiedergeben und zuverlässige Prognosen für die Zukunft tref-

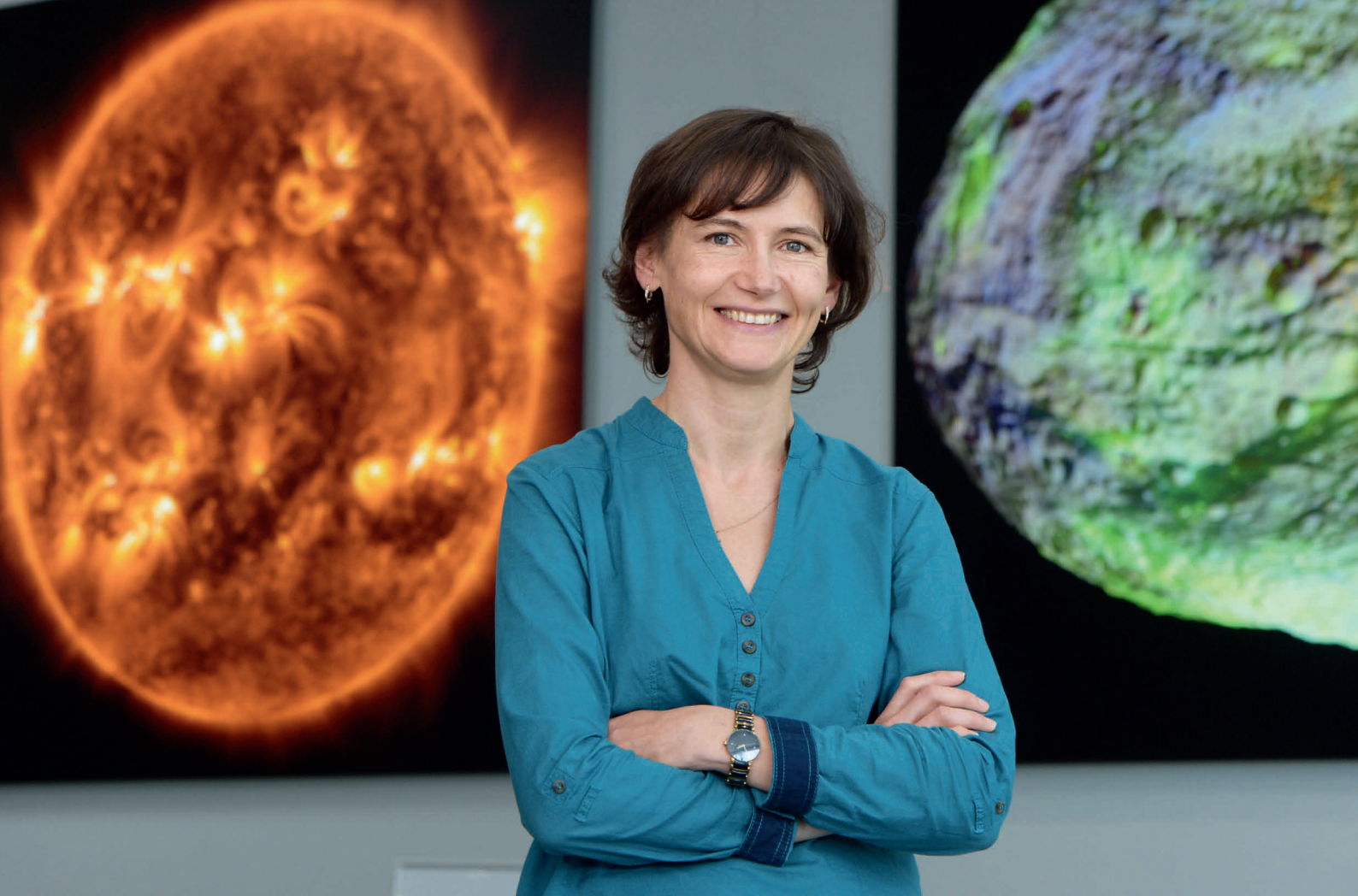
fen, müssen sie mit Messdaten aus der Vergangenheit gefüttert werden. Für die Simulation des Meeresspiegels benötigt man Pegelmessungen, für die Simulation der Sonnenaktivität Strahlungsmessungen und viele andere Sonnenbeobachtungen von Satelliten.

MESSUNGEN VON ISOTOPEN ALS STELLVERTRETER-DATEN

Bei der Datenlage haben die Forscher allerdings ein grundsätzliches Problem. Die physikalischen Modelle müssen längere Zeiträume berechnen: Wer wissen will, wie sich Klima und Sonne in den kommenden Jahrzehnten und Jahrhunderten verändern, braucht deshalb auch Daten, die weit zurückreichen – Jahrhunderte oder besser noch

Die gesamte Strahlungsleistung der Sonne schwankt in einem Elfbjahresrhythmus. Die Daten, die mit dem Modell SATIRE-S simuliert werden (rote Punkte), stimmen zu 92 Prozent mit den darunterliegenden Messwerten (schwarze Punkte) überein. Bei den kurzen starken Einbrüchen der TSI wandern dunkle Flecken über die sichtbare Sonnenoberfläche.





Sonnenforschung mit Strahlkraft: Das Modell, das Natalie Krivova und ihre Mitarbeiter entwickelt haben, gibt die Schwankungen der solaren Strahlungsleistung sehr zuverlässig wieder. Daher wird es auch in Klimasimulationen für die Weltklimaberichte des IPCC verwendet.

Jahrtausende vor unserer Zeit. In der Regel gibt es aber erst seit wenigen Jahrzehnten zuverlässige Messdaten, mit denen man die Modelle füttern kann.

Die Daten, die Natalie Krivova in ihre Modelle einspeist, reichen bis 1974 zurück, die Zählungen von Sonnenflecken bis zu Galileo Galilei. Aber dann? Gibt es keine echten Messwerte, so behelfen sich Forscher mit Stellvertreterdaten, sogenannten Proxys. Das macht auch Natalie Krivova so.

Die Astronomin nutzt Messwerte des schweren Kohlenstoffisotops ^{14}C oder des Berylliumisotops ^{10}Be als Stellvertreter. Diese beiden radioaktiven Isotope entstehen in der Atmosphäre durch den Beschuss mit hochenergetischen kosmischen Teilchen, ^{14}C zum Beispiel beim Zerfall eines Stickstoffisotops. ^{14}C geht nach einigen Jahren in den globalen Kohlenstoffkreislauf über, indem es als Kohlenstoff in Pflanzen eingebaut wird. Pflanzen nehmen ^{14}C stets in einem Mengenverhältnis auf, das dem in der Luft entspricht. Mit dem

Absterben der Pflanzen endet die ^{14}C -Aufnahme. Dann sinkt dessen Anteil etwa im Holz eines toten Baums durch den radioaktiven Zerfall des Isotops – bei ^{14}C mit einer Halbwertszeit von 5730 Jahren.

Aus dem ^{14}C -Gehalt von Holzproben heute lässt sich die ^{14}C -Konzentration in der Atmosphäre zu jener Zeit berechnen, als der Kohlenstoff im Holz eingebaut wurde. Dafür müssen Forscher das Alter der Probe kennen. Dieses lässt sich anhand der charakteristischen Jahresringe von Baumstämmen bestimmen, für die es inzwischen weit zurückreichende lückenlose Profile gibt.

DIE SONNENINTENSITÄT DER VERGANGENEN 11000 JAHRE

Die aus den Holzproben ermittelte atmosphärische ^{14}C -Konzentration zu einer bestimmten Zeit hängt direkt damit zusammen, wie stark die Erde mit energiereichen geladenen Partikeln beschossen wird.

Motor für die Schwankungen im Teilchenbeschuss ist das Magnetfeld der Sonne. Denn das Magnetfeld der Sonne wirkt für die Erde wie eine Art Schutzschirm, welcher den Beschuss durch die hochenergetischen kosmischen Teilchen abschwächt. Wenn das Magnetfeld der Sonne schwächer ist, dann ist die Erde weniger gut geschützt. Die Stärke des solaren Magnetfeldes beeinflusst auch die Anzahl der Sonnenflecken und die Strahlungsleistung der Sonne. So lassen sich ^{14}C -Messungen von Holzproben also nutzen, um über die Stärke des Magnetfelds indirekt die Strahlungsintensität der Sonne zu rekonstruieren.

Auf ähnliche Weise dienen die ^{10}Be -Konzentrationen als Stellvertreterdaten für die Strahlungsintensität. Allerdings sinkt Beryllium aus der Atmosphäre ab und schlägt sich schließlich am Boden nieder. So finden sich historische Berylliumspuren heute tief in dem Eispanzer von Gletschern auf Grönland und in der Antarktis.

» Die Treibhausgase haben zur Veränderung des Wärmehaushalts der Erde in den vergangenen Jahrzehnten vielfach stärker beigetragen als die Sonne.«

Zusammen mit anderen Forschern ist es Krivova gelungen, mithilfe dieser Proxys die Variabilität der Sonnenintensität für die vergangenen 11 000 Jahre seit der letzten Eiszeit im Detail zurückzurechnen. Im Vergleich mit den Modellen anderer Forschergruppen hat sich Krivovas Simulationswerkzeug als sehr zuverlässig erwiesen. Klimamodellierer nutzen es deshalb auch für jene Simulationen, die in den Weltklimabericht des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) einfließen.

Doch es geht noch besser, glaubt Krivova. Sonnenflecken und 14C-Proxys sind nicht alles – die Variabilität der Sonnenstrahlung hängt von vielen Faktoren ab. Sonnenflecken entstehen vor allem

in Bereichen, in denen das Magnetfeld der Sonne besonders stark ausgeprägt ist. Hier stört das starke Magnetfeld den Wärmetransport aus dem Sonneninnern an den Rand des Gasballons. Die Sonnenflecken sind folglich Stellen in der Sonnenoberfläche, an denen weniger Strahlung abgegeben wird. Deshalb erscheinen sie dunkler.

Man sollte vermuten, dass die Strahlungsleistung der Sonne abnimmt, wenn zum Zyklusmaximum besonders viele Sonnenflecken auftauchen. Doch das Gegenteil ist der Fall. Denn während der aktiven Phase entstehen zugleich sehr viele kleinere, helle Bereiche, die vor allem im UV-Licht strahlen. Diese vielen sogenannten Faculae, Fa-

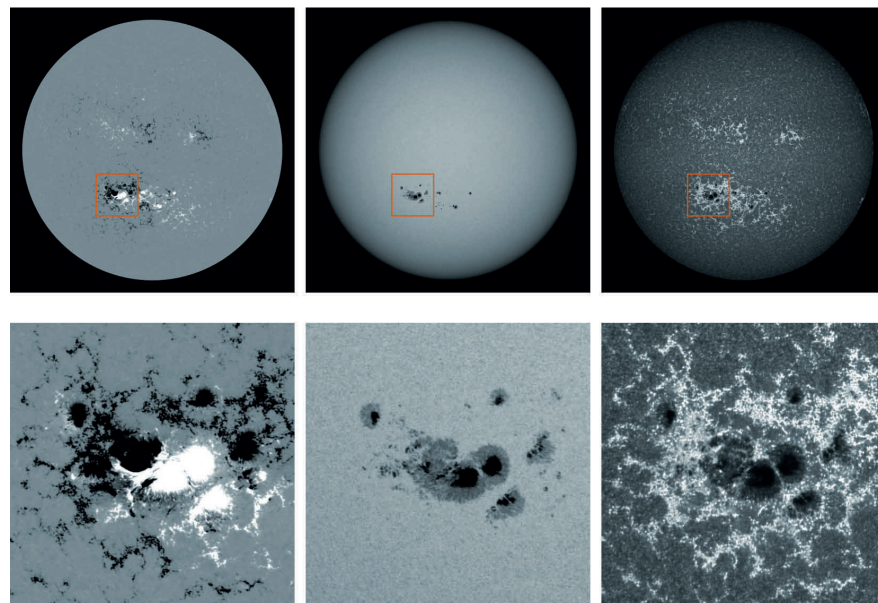
ckeln, strahlen in der Summe stärker und machen die Strahlungsdämpfung in den Sonnenflecken mehr als wett.

Anders als Sonnenflecken lassen sich Faculae nur im UV-Bereich entdecken. Forscher nutzen dafür Magnetogramme, Spezialinstrumente auf Satelliten, die die Veränderungen im Magnetfeld deutlich sichtbar machen – und damit eben nicht nur Sonnenflecken erspähen, sondern auch die Faculae, denn bei diesen ist das Magnetfeld ebenfalls besonders stark.

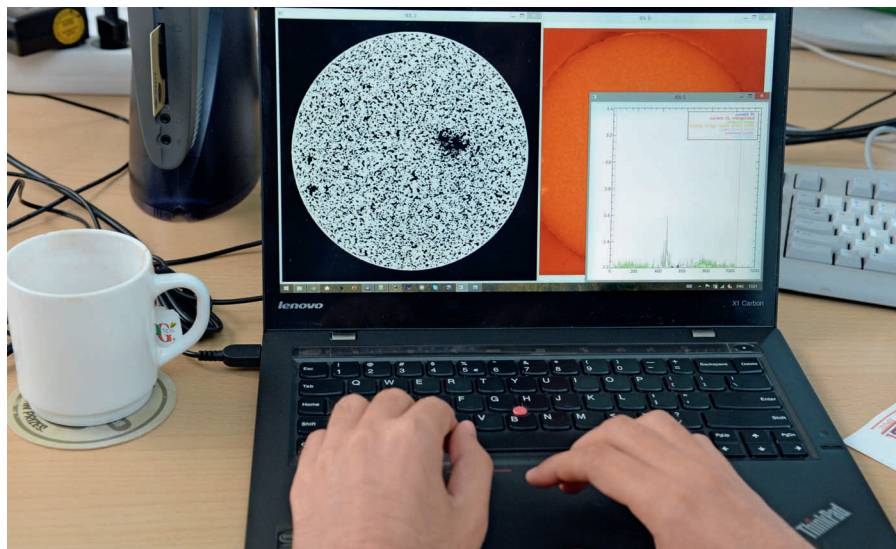
EIN UNGEHOBENER SCHATZ: FOTOS IM CALCIUM-II-BAND

Krivova füttert ihr Modell mit den Aufnahmen aus den Magnetogrammen, und den sogenannten Magnetogrammen, und den darin enthaltenen Informationen über die Größe und Stärke der Faculae. Zusammen mit ihrem Doktoranden Kok Leng Yeo ist es ihr auf diese Weise gelungen, das Modell so zu verfeinern, dass es derzeit als das präziseste Strahlungsmodell gilt.

Doch es gibt ein Problem: Anders als für die Sonnenflecken gibt es bislang keine brauchbaren Faculae-Daten aus der Zeit vor der Satellitenära. Magnetogramme ausreichender Qualität gibt es



Die Sonne in verschiedenen Ansichten: Der Satellit *Solar Dynamics Observatory* (SDO) ist mit Instrumenten bestückt, die das Magnetfeld in seiner Blickrichtung (links), rotes Licht (Mitte) und ultraviolettes Licht (rechts) abbilden. Helle und dunkle Bereiche stehen dabei für ein starkes Magnetfeld in Sonnenflecken und Faculae. Die Bilder in der unteren Reihe zeigen jeweils den markierten Ausschnitt im Bild darüber.



Faculae-Strukturen sind auf Aufnahmen im Calcium-II-Band, die drei Observatorien seit rund 100 Jahren gemacht haben, gut zu erkennen (links). Nach ihnen durchsucht Theodosios Chatzistergos (rechts) systematisch 60000 Aufnahmen der Sonne.

erst seit den frühen 1970er-Jahren, also noch nicht lange genug. Zusammen mit ihrem Doktoranden Theodosios Chatzistergos will Krivova deshalb einen bislang ungehobenen Schatz nutzen: Vor etwa 100 Jahren begannen Astronomen damit, die Sonne mit einem speziellen Verfahren zu fotografieren. Sie benutzten dafür Fotoplatten, die nur in einem bestimmten Bereich des Sonnenspektrums empfindlich sind, im sogenannten Calcium-II-Band. In diesem Wellenlängenband strahlen starke Magnetfeldbereiche wie die Faculae besonders hell.

DAS NETWORK KÖNNTE LANGFRISTIGE TRENDS ERKLÄREN

Bislang wurden die Calcium-II-Fotografien noch nicht systematisch untersucht. Das hat sich Theodosios Chatzistergos vorgenommen – eine Riesenaufgabe. Er will 60000 Einzelaufnahmen von drei Observatorien systematisch nach Faculae-Strukturen durchsuchen. Dafür hat er eine Software geschrieben, die die Faculae-Flächen auf den Bildern automatisch detektiert. Durch den Vergleich von Aufnahmen dreier verschiedener Observatorien wird er Artefakte und Bildfeh-

ler erkennen können. „Wir hoffen, dass wir die Variabilität der Sonnenstrahlung dank dieser einzigartigen Faculae-Daten noch besser verstehen werden“, sagt Krivova.

Und dann hat Natalie Krivova noch eine leise Hoffnung: Neben den Sonnenflecken und den Faculae gibt es eine dritte Struktur auf der Sonnenoberfläche, die die Strahlungsintensität beeinflusst. Ein feines Netzwerk noch kleinerer heller Flecken, das von Astronomen schlicht als Network bezeichnet wird. „Wir wissen sehr wenig über das Network“, sagt Krivova. „Wir vermuten, dass es ebenfalls einen Zyklus aufweist, der jedoch zeitversetzt zum Sonnenfleckenzyklus schwankt.“

Krivova und auch andere Forscher glauben, dass dieses Network zu den graduellen langfristigen Schwankungen in der Strahlungsintensität der Sonne beiträgt – den langen Phasen im Laufe der Jahrtausende, in denen es besonders viele oder wenige Sonnenflecken gab, so wie während der Kleinen Eiszeit. „Secular change“ nennen die Experten diesen Langfristtrend – „langsame, systematische Veränderung“. „Die Rolle, die das Network dabei spielt, ist noch weitgehend unverstanden – wir hoffen daher sehr, in den Calcium-II-Aufnah-

men auch das Network erkennen und analysieren zu können.“

Was die langfristige Änderung der Sonnenaktivität betrifft, tritt die Sonne derzeit offenbar in eine aus Perspektive der Erdbewohner sehr interessante Phase ein. Denn Zählungen der Sonnenflecken in den vergangenen Jahren deuten darauf hin, dass die Sonnenaktivität nach 60 starken Jahren wieder abnimmt. Für die kommenden Jahrzehnte erwarten die Forscher eine Abnahme der Sonnenstrahlung. Am Klimawandel zweifelnde Skeptiker behaupten nun, dass diese Abkühlung die Erderwärmung ausgleichen könnte, die durch den Ausstoß der Treibhausgase durch den Menschen verursacht wird. Doch Krivova winkt ab: „Aktuelle wissenschaftliche Arbeiten und die Berichte des IPCC zeigen deutlich, dass die Treibhausgase zur Veränderung des Wärmehaushalts der Erde in den vergangenen Jahrzehnten vielfach stärker beigetragen haben als die Sonne.“

DIE UV-STRALUNG SOLL GENAUER ERFORSCHT WERDEN

Krivova will weiter daran arbeiten, das wechselhafte Wesen der Sonne zu verstehen. Dazu gehört für sie vor allem



auch eine genauere Erforschung der ultravioletten Strahlung – die ja wesentlich zur Variabilität der Sonnenstrahlung beiträgt. Die UV-Strahlung wird vor allem beeinflusst durch das Magnetfeld in der äußeren Hülle der Sonne, der Chromosphäre.

Die Chromosphäre schwebt über der Photosphäre, die wir Menschen von der Erde aus als scheinbare Oberfläche des Gasballons Sonne sehen. Die Vorgänge in der Chromosphäre sind jedoch so kompliziert, dass sie sich nur schwer in Modellen berücksichtigen lassen. Natalie Krivova will nun aber versuchen, ihren Modellen eine Art Rechenmodul für die Chromosphäre einzupflanzen.

Mit den Untersuchungen zur Strahlungsleistung der Sonne ist ihre Arbeitsgruppe am Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung nicht allein. Sie und ihre Mitarbeiter kooperieren eng mit anderen Gruppen aus dem Bereich „Sonne und Heliosphäre“ unter Sami Solankis Leitung. Die Arbeit wiederum ist Teil des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderten Forschungsprogramms ROMIC (Role of the Middle atmosphere in Climate), in dem zurzeit die mittlere Erdatmosphäre genauer untersucht wird.

Zwar spielen sich das Wetter und das Klima auf der Erde in den bodennahen Atmosphärenschichten, der Troposphäre, ab. Doch haben die Vorgänge in den Etagen darüber einen erheblichen Einfluss auf die Troposphäre. Die Prozesse in der mittleren Atmosphäre haben For-

scher bis heute nicht wirklich verstanden. Auch das Wissen über den Einfluss der Sonne ist fragmentarisch. Natalie Krivova und ihre Kollegen am Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung werden also auch künftig immer wieder solares Neuland betreten. ◀

AUF DEN PUNKT GEBRACHT

- **Schwankungen in der Strahlungsleistung der Sonne können zur Erderwärmung beitragen oder ihr entgegenwirken. Daher müssen Klimaprognosen den Einfluss der schwankenden Sonneneinstrahlung berücksichtigen.**
- **Die Strahlungsleistung der Sonne ist besonders hoch, wenn diese besonders aktiv ist. Sie schwankt in einem Zyklus von elf Jahren, unterliegt aber auch langfristigen Trends.**
- **Mit Beobachtungen des Magnetfeldes der Sonne, mit der Zahl der Sonnenflecken und Daten zu Isotopen kosmischen Ursprungs verfeinern Astronomen des Max-Planck-Instituts für Sonnensystemforschung ihr Modell der Sonneneinstrahlung (TSI).**

GLOSSAR

Faculae, auch Sonnenfackeln genannt: Helle Flecken auf der Sonnenoberfläche. Sie treten vermehrt auf, wenn die Sonne besonders aktiv ist.

Leistungsdichte der Sonneneinstrahlung (TSI): Energiefluss der Sonnenstrahlung, die beim mittleren Abstand zwischen Sonne und Erde pro Quadratmeter Fläche auf den Oberrand der Erdatmosphäre trifft.

Network: Ein Netz kleinerer heller Flecken könnte zu den langfristigen Veränderungen der Sonnenaktivität beitragen, ist bisher aber wenig erforscht.