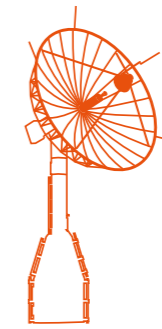


Ein mittelgroßer sogenannter Flare der Sonne, ein helles Bild des Fixsterns, das durch Reflexionen an einer oder mehreren Linsen im Objektiv entsteht. Es zeigt im extremen Ultraviolett einen spektakulären koronalen Massenauswurf am 7. Juni 2011.

Bild: NASA/SDO and the AIA, EVE, and HMI science teams

# WENN DIE SONNE PLASMA SPUCKT



Forscher in Neustrelitz arbeiten an der Vorhersage des Weltraumwetters

Von Fabian Locher

Der Blick ins All: endlose Weite, Stille, Frieden ... Doch halt: Auf der Sonne verursachen gigantische Eruptionen extreme Winde. Energetische Teilchen werden aus der Sonnenkorona ins Weltall geschleudert. Sonnenstürme können ionosphärische Störungen in der Atmosphäre verursachen und so die sensible Infrastruktur unserer Hightech-Gesellschaft gefährden. Denn unsere alltägliche Kommunikation und Navigation ist satellitengestützt. DLR-Wissenschaftler forschen an den Ursachen und Auswirkungen des sogenannten Weltraumwetters. Am Standort Neustrelitz bauen Wissenschaftler des Instituts für Kommunikation und Navigation und des Deutschen Fernerkundungsdatenzentrums zusammen ein „Ionosphere Monitoring and Prediction Center (IMPC)“ auf. Das IMPC wird ein Weltraumwetter-Beobachtungs-, Vorhersage- und Warndienstzentrum für Industrie, Regierung, Wissenschaft und für interessierte Laien.

## Eruptionen auf unserem Fixstern

Vor 4,5 Milliarden Jahren entstand unser Sonnensystem aus einer Wolke aus Gas und Staub. Auch heute noch ist die Sonne ein sehr aktiver Stern. Sie sendet nicht nur wärmendes Licht, sondern auch einen ständigen Strom elektrisch geladener Teilchen aus – den Sonnenwind. Auf ihrer 5.500 Grad Celsius heißen Oberfläche können ohne jede Vorwarnung explosionsartige Eruptionen auftreten. Der Teilchenstrom, der ins Weltall geschleudert wird, ist dann in einem begrenzten Gebiet kurzzeitig deutlich stärker als sonst – ein Prozess, den die Forscher als „Sonnensturm“ bezeichnen. Treffen die energiegeladenen Teilchen auf die Erde, können sie technische Systeme in unserem Orbit beschädigen. Eine exakte Vorhersage solcher Eruptionen ist derzeit noch nicht möglich, da die physikalischen Zusammenhänge, die zu ihrem Auftreten führen, teilweise noch unverstanden sind.

Um festzustellen, ob ein Sonnensturm die Erde trifft, wie stark dieser werden wird, und was dagegen getan werden kann, nutzen DLR-Wissenschaftler Daten von Sonnenbeobachtungssatelliten. In 1,5 Millionen Kilometer Entfernung von der Erde funktionieren diese Satelliten wie Warnbojen. Drei Satelliten kreisen in dieser lebensfeindlichen Umgebung: SOHO, ACE und DSCOVR (siehe Glossar, Seite 33). Dabei dient der „Lagrange-Punkt“ L1 als Basis. L1 ist ein stabiler Punkt im System Sonne-Erde, an dem die Satelliten mit geringem Energieaufwand verharren können. Dabei tun ihre „Augen“ genau das, was wir Menschen auf der Erde dringend vermeiden sollten: Sie schauen direkt in die Sonne.

Die Satelliten erfüllen dabei spezielle Beobachtungsaufgaben: SOHO fotografiert die Sonne unter anderem im UV-Bereich. ACE ist seit 1997 aktiv und wurde 2015 durch DSCOVR ergänzt. Beide

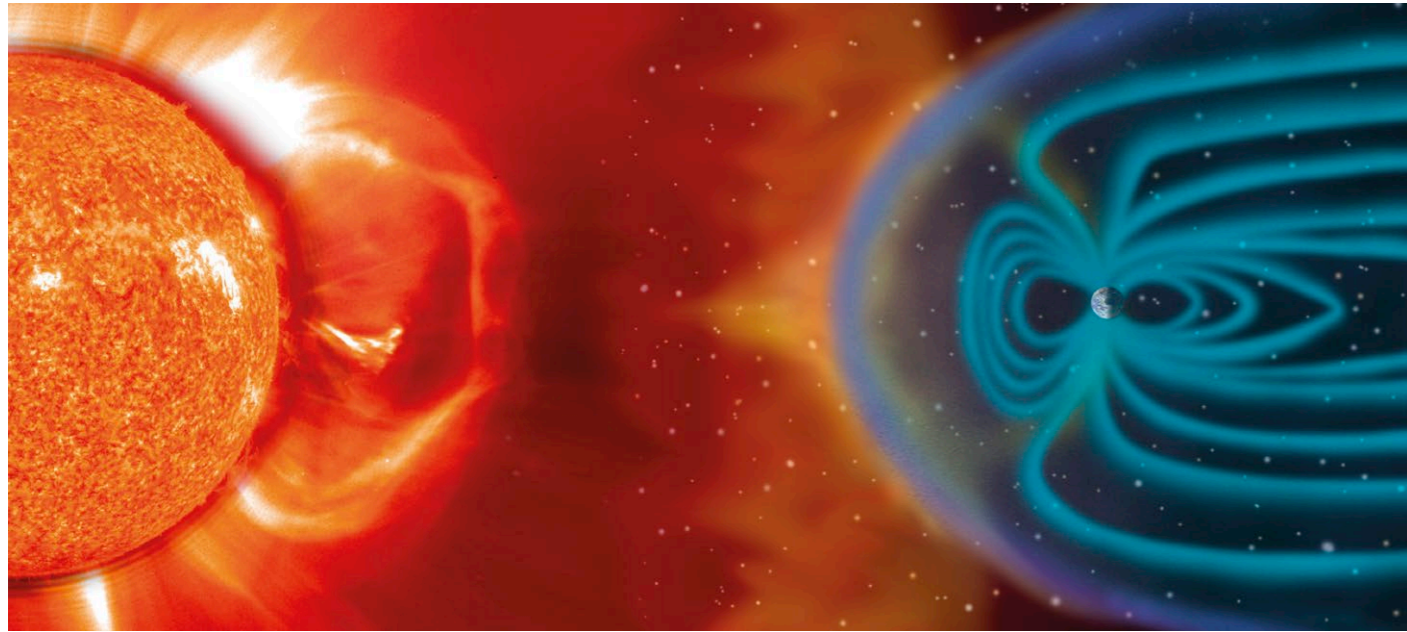


Bild: NASA/SDO and the AIA, EVE, and HMI science teams

Illustration eines koronalen Massenauswurfs der Sonne und dessen Folgen für die Erde

Satelliten messen neben der Temperatur und der Protonendichte auch das interplanetarische Magnetfeld sowie die Geschwindigkeit des Sonnenwindes.

### Wolke von Hochenergie-Teilchen

Wenn sich ein Teilchensturm zusammenbraut, werden geladene Teilchen als Plasmawolke in die Weiten des Alls geschleudert. Sobald der extreme Sonnenwind den Lagrange-Punkt L1 passiert, messen die Satelliten ACE und DSCOVR die veränderten Parameter. Mit Lichtgeschwindigkeit wird das Signal zur Empfangsstation gesendet. Der Sturm bewegt sich allerdings deutlich langsamer. Als gigantische Plasmawolke bahnt er sich mit 800 bis 2.000 Kilometern pro Sekunde seinen Weg durch die Heliosphäre, jenen weitreichenden interplanetaren Bereich um die Sonne. Die gewaltigen Antennen in Neustrelitz empfangen das Signal der Satelliten. An diesem Standort des DLR in Mecklenburg-Vorpommern steht die einzige europäische Empfangsstation des Echtzeit-Sonnenwindbeobachtungsnetzwerks – weitere Stationen befinden sich in den USA, in Südkorea und in Japan. DLR-Wissenschaftler werten die Daten aus und können schnell auf erhöhte Sonnenwindparameter reagieren. Die Forscher analysieren das interplanetare Magnetfeld und berechnen den dynamischen Druck des Sonnenwindes am Lagrange-Punkt L1. Dann herrscht Gewissheit: Ja, es ist ein Sonnensturm, ja, er bewegt sich in Richtung Erde, und ja, er wird unsere Erde erreichen. Weltraumwetter-Experten sprechen dann davon, dass sich energetische Plasmateilchen effektiv in die Erdatmosphäre „einkoppeln“.

Von diesem Zeitpunkt an haben die Forscher eine Vorlaufzeit von 30 bis 60 Minuten – je nachdem, wie schnell der Sonnenwind unterwegs ist. Jetzt beginnen die Berechnungen: Wie stark werden die Auswirkungen des Sonnensturms sein? Wie effizient wird er sich in die Erdatmosphäre einkoppeln? Mit diesen Informationen können die Wissenschaftler Vorhersagen machen und eventuelle Störungen von technischen Systemen im Bereich der Kommunikation und Navigation prognostizieren.

### Polarlichter und Funkstörungen

Unsere Erde ist vor schwachen Sonnenstürmen durch die Atmosphäre und ihr Magnetfeld weitestgehend geschützt. Letzteres führt die ankommenden geladenen Teilchen in einem Abstand von etwa zehn Erdradien (rund 70.000 Kilometer) entlang der Magnetfeldlinien um die Erde herum. In großen Höhen und in den Polargebieten ist dieser Schutz allerdings schwächer. Denn dort sind die Feldlinien des Magnetfelds stärker gegen die Erdoberfläche geneigt. Das macht diese Regionen anfälliger für die Auswirkungen von Sonnenstürmen.

Die Reflexion von Kurzwellen an der Ionosphäre ermöglicht weltweiten Funkverkehr. Die Ionosphäre besteht aus freien Elektronen und Ionen. Das macht sie zu einer geladenen Schicht und damit anfällig für Ströme geladener Sonnenwindteilchen oder Magnetfeldänderungen. Kurze, aber intensive Störungen werden von sogenannten Flares ausgelöst, intensiven Strahlungsausbrüchen, die in der Gasschicht entstehen, von der die Sonne umgeben ist. Häufig werden bei einem solchen Flare auch geladene Teilchen ausgeworfen, dann spricht man von einem koronalen Massenauswurf. Als riesige Plasmawolke reisen diese Teilchen von der 150 Millionen Kilometer entfernten Sonne zur Erde. In der Folge entstehen nicht nur schöne Polarlichter, sondern die energetischen Teilchen können sich auch auf Raumsonden, technische Systeme im Weltraum und auf der Erde sowie auf das Leben und die Gesundheit der Menschen auswirken. Sie verändern die Anzahl der freien Elektronen und damit die Schichtdicke der Ionosphäre. Das ionosphärische Plasma verursacht Brechung, Beugung, Streuung und Absorption von Radiosignalen und ist die größte Fehlerquelle in den Ein-Frequenz-Positionierungssystemen, die in Navigationsgeräten und Smartphones integriert sind.

Damit die genaue Positionsangabe auch bei extremen Sonnenstürmen möglich wird, ist eine Korrektur des ionosphärischen Ausbreitungsfehlers sehr wichtig. Dieser Fehler (englisch „Range Error“) entsteht bei der Signalausbreitung vom Satelliten zur Bodenstation und hat seine Ursache in den Verzögerungen der Signallaufzeit in der Ionosphäre. Bei starken geomagnetischen Stürmen ist aber nicht nur die Navigation, sondern auch der Hochfrequenz-Funkverkehr gestört. Zu spüren bekommt das unter anderem die zivile Luftfahrt. Beim modernen, schnell getakteten Aufeinanderfolgen von Starts und Landeanflügen spielen satellitenbasierte Ergänzungssysteme („SBAS“, Space Based Augmentation System) eine entscheidende Rolle. Diese unterstützen bereits vorhandene Satellitennavigationssysteme und erhöhen deren Genauigkeit, Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit. Sobald die für die Sicherheit nötige Genauigkeit nicht mehr gewährleistet werden kann, dürfen die Unterstützungssysteme nicht mehr verwendet werden. Verzögerungen im Flugverkehr sind die Folge.

### Folgen auch für Ackerbau und Stromversorgung

Aber nicht nur die Luftfahrt ist von Störungen durch das Weltraumwetter betroffen. Schneeräumfahrzeuge in Norwegen beispielsweise benötigen hochgenaue Positionsdaten, um sich durchs blickdichte Schneegestöber zu manövrieren. Landwirte, die sich dem „Präzisionsackerbau“ verschrieben haben, benutzen automatisierte Düngefahrzeuge, die dank GPS-Daten den Einsatz von Düngemitteln deutlich reduzieren

können. Auch im Schiffsverkehr werden präzise Navigationsdaten verwendet, um eine genaue Positionierung im Hafengebiet zu ermöglichen oder um den optimalen Seeweg zu berechnen. Bei sehr starken geomagnetischen Stürmen müssen auch Stromnetzbetreiber mit induzierten Strömen rechnen, die zu technischen Problemen und damit zu Stromausfällen führen können. Die Elektronik von TV- oder Mobilfunk-Satelliten könnte durch energiereiche Partikelstrahlung in einem extremen Sonnensturm zerstört werden. Für Astronauten stellen die erhöhten Strahlendosen sogar eine lebensbedrohliche Gefahr dar. Außerhalb der schützenden Atmosphäre sind sie bei Weltraumspaziergängen der gefährlichen hochenergetischen Teilchenstrahlung direkt ausgesetzt.

„Normale“ Flugreisende hingegen sind in der typischen Reiseflughöhe von elf Kilometern durch die Atmosphäre weitestgehend vor einer deutlich erhöhten Strahlendosis geschützt. Da dieser natürliche Schutz in den Polarregionen schwächer wird, werden bei starken Sonnenstürmen die Polar routen vermieden beziehungsweise es wird etwas tiefer geflogen, um die Schutzzone der Atmosphäre größer zu halten.

### Beobachten, warnen, schützen

Auch wenn Stärke und Verlauf eines Sonnensturms nicht exakt vorhersehbar sind, so kann man sich dennoch (ganz ähnlich wie bei einem Hurrikan) auf das Ereignis einstellen. Weltraumwetter-Experten sind in der Lage, anhand veränderter Elektronenzahlen in der Ionosphäre zu berechnen, welche Störungen im Informationsaustausch des Systems Bodenstation-Satellit zu erwarten sind. „Eine zuverlässige und exakte Vorhersage des Weltraumwetters ist von entscheidender Bedeutung, um geeignete Schutzmaßnahmen ergreifen zu können“, sagt Dr. Jens Berdermann vom DLR-Institut für Kommunikation und Navigation. Die aus Ionosphärenmodellen errechneten Korrekturen können dann an die Nutzer eines Frühwarnservices weitergegeben werden. Die Informationen der ACE/DSCOVR-Satelliten ermöglichen es beispielsweise Betreibern von Satelliten, bei sehr starken Ereignissen die empfindlichen Mess- und Kommunikationsbereiche der Satelliten rechtzeitig aus dem Sonnenwind zu drehen oder Satelliten komplett abzuschalten. So kann ein elektrisches Aufladen der sensiblen elektronischen Systeme in Folge von Sonnenwinden vermieden werden.

Damit durch eine bessere Vorhersage von Weltraumwetter-Effekten unsere hoch technisierte Gesellschaft vor den vielfältigen Gefahren bis hin zu einem Blackout bewahrt wird, arbeiten die Wissenschaftler am Aufbau eines erweiterten Beobachtungs- und Vorhersagezentrums: dem „Ionosphere Monitoring and Prediction Center (IMPC)“. Bereits mit dem „Space Weather Application Center (SWACI)“ haben die DLR-Forscher bewiesen, dass sie eine Vielzahl erd- und weltraumbasierender Ionosphären-Daten in Echtzeit analysieren und auswerten können. Der nächste Schritt ist der Aufbau des IMPC: „Wir wollen im IMPC das bereits aufgestellte automatische Warnsystem noch besser an die Bedürfnisse der diversen Nutzer anpassen“, erklärt Dr. Jens Berdermann, Gruppenleiter im DLR Neustrelitz. Das Warnsystem ist sowohl für Wissenschaftler interessant als auch für die Betreiber von Systemen im Bereich satelliten-gestützter Kommunikation und Navigation.

### Service für unterschiedliche Nutzergruppen

Je nach Notwendigkeit und Bedarf können sich die Nutzer für einzelne oder mehrere Serviceleistungen („Stufen“) registrieren.

Stufe eins – Früherkennung: Auf Basis von Echtzeit-Beobachtungsdaten des Royal Observatory of Belgium (ROB) und Daten des gerade entstehenden globalen Flare-Detection-Systems (GIFDS) werden Flares und koronale Massenauswürfe detektiert und Ankunfts-wahrscheinlichkeiten berechnet. Damit ist eine ungefähre Vorhersage (zwei bis drei Tage) schon möglich, die genaue Stunde lässt sich jedoch noch nicht bestimmen. Interessant ist diese erste Stufe vor allem für die Forschung, weniger für industrielle Nutzer.

Stufe zwei – Lagrange-Punkt L1: Messen die Satelliten ACE und DSCOVR auf L1 einen Sonnensturm, so wird dieser auch die Erde erreichen. Wie stark der Sturm ausfallen wird, hängt allerdings von vielen Faktoren ab,

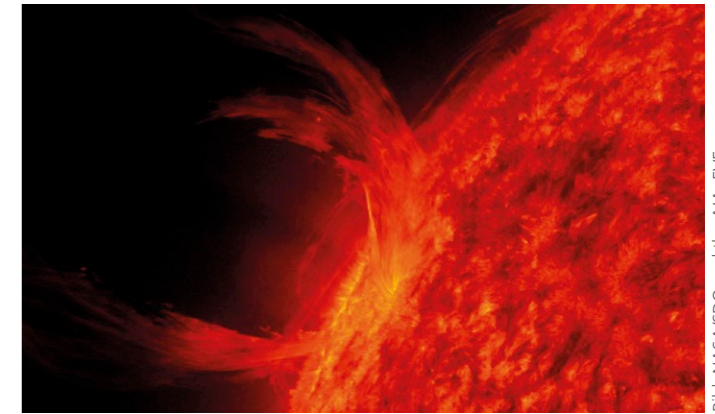


Bild: NASA/SDO and the AIA, EVE, and HMI science teams

## KURZE GESCHICHTE DES WELTRAUMWETTERS

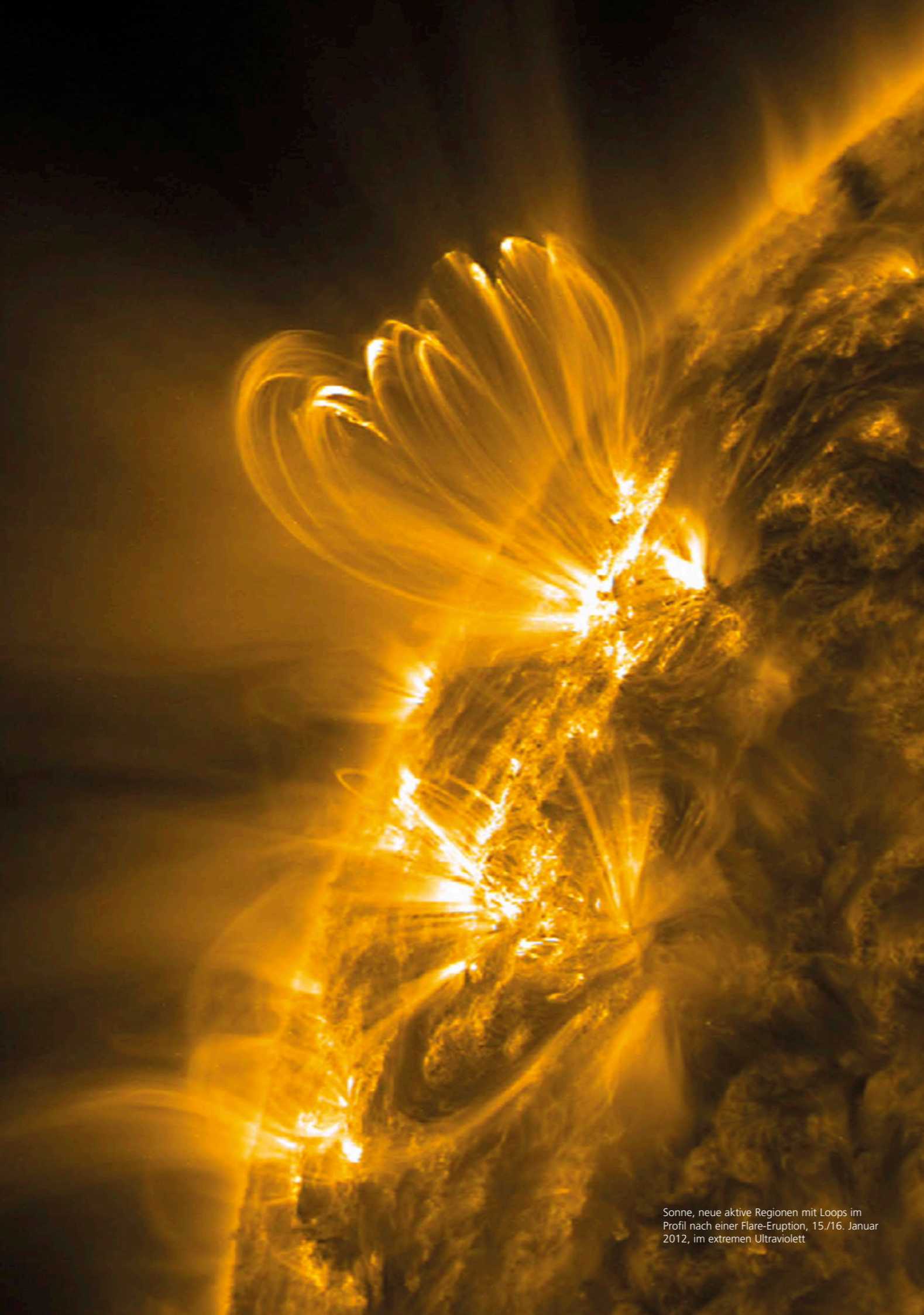
**1859 – Carrington-Event:** Beim Nachzeichnen von Sonnenflecken entdeckte der Hobbyastronom Richard Carrington eine gewaltige Eruption auf der Sonne. Dieses Ereignis gilt als bisher größter wissenschaftlich beobachteter magnetischer Sturm und wird als Beginn der Weltraumwetter-Forschung angesehen. An den Telegrafestationen sollen die Mitarbeiter Stromschläge erlitten haben. Heute hätte ein ähnlich starkes Ereignis katastrophale Auswirkungen. Wissenschaftler schätzen, dass ein Sturm solcher Größenordnung im statistischen Mittel alle 500 Jahre auftritt.

**1921 – Mai-Sturm:** Einer der stärksten Sonnenstürme des 20. Jahrhunderts erzeugt in Überlandleitungen extrem hohe Ströme. Die nördliche Hemisphäre ist bis nach Mexiko und Puerto Rico betroffen, die südliche bis in die Breiten von Samoa. Ein ähnlicher Sturm würde heute die Hälfte der Stromnetze in Nordamerika kollabieren lassen.

**1989 – Québec, Kanada:** Ein heftiger geomagnetischer Sturm führt zu einem neunstündigen Stromausfall in der Region um Montreal. Verkehrsleitsysteme, Flughäfen und Fernwärmeversorgung fallen aus. Rund sechs Millionen Menschen sind betroffen.

**2003 – Halloween-Sturm:** Innerhalb von zwei Wochen werden siebzehn größere Flares beobachtet, kurzzeitig ist der Funkverkehr gestört. Im schwedischen Malmö fällt ein Teil des Stromnetzes aus. Luftkorridore in Nord-Kanada werden für Passagierflugzeuge geschlossen. Signale von Satelliten- und Navigationssystemen fallen zeitweise aus. Die Partikelwolke ist bis zu dreizehnmal so groß wie die Erde und bewegt sich mit 1,6 Millionen Kilometern pro Stunde. Ein Satellit wird komplett zerstört, 27 Satelliten weisen Anomalien in ihrer Funktionstüchtigkeit auf.

**Ausblick:** Zerstörte Kommunikations- und Positionierungssysteme, Einschränkungen des Luft- und Schiffsverkehrs und ökonomische Schäden in Milliardenhöhe – ein extremer geomagnetischer Sturm ist ein seltenes, aber folgenschweres Ereignis. Eine Vorhersage des Weltraumwetters gäbe Satellitenbetreibern Vorlauf, um entsprechend zu reagieren und Folgekosten von Sonnenstürmen zu reduzieren. Seit Anfang des Jahres 2000 richtet das DLR nationale Weltraumwetter-Workshops aus, um Entscheidungsträger zusammenzubringen und für das Thema zu sensibilisieren. Die Gruppe „Ionosphärische Effekte und Korrekturen“ des Instituts für Kommunikation und Navigation arbeitet am Aufbau eines permanenten Weltraumwetter-Service, dem „Ionosphere Monitoring and Prediction Service“ (IMPC).



Sonne, neue aktive Regionen mit Loops im Profil nach einer Flare-Eruption, 15./16. Januar 2012, im extremen Ultraviolett



Antennenanlage am DLR Neustrelitz für den Empfang von Weltraumwetter-Daten

insbesondere vom interplanetaren Magnetfeld und davon, ob sich die Teilchen des Sonnensturms gut in die Erdatmosphäre einkoppeln. Zu diesem Zeitpunkt kann bereits eine genaue Vorhersage gemacht und eine Warnung herausgegeben werden. Ab der Messung am L1-Punkt erreicht der Sonnensturm (abhängig von der Sonnenwindgeschwindigkeit) die Erdatmosphäre mit einem Zeitverzug von 30 bis 60 Minuten. Dort angekommen, breiten sich die Störungen in der Ionosphäre in zwei bis drei Stunden von den Polarregionen bis in mittlere Breiten aus. Dadurch, dass der Einfluss des Sonnenwindes zeitlich eingegrenzt werden kann, öffnet sich für die Industrie ein hilfreiches Zeitfenster. Dieses bietet genügend Vorwarnzeit für viele Anwendungen, sodass technische Systeme zeitnah angepasst oder abgeschaltet werden können.

Stufe drei – Vorhersage: Mit empirischen und zukünftig auch physikalischen Modellen wird prognostiziert, wann und wo welche Störung zu erwarten ist.

Stufe vier – Echtzeit-Verfolgung: Die Rechenmodelle werden durch Echtzeitmessungen der Ionosphäre stetig kontrolliert und angepasst. Dadurch können die Wissenschaftler akkurat bestimmen, ob die Gefahr vorbei ist, und entsprechend Entwarnung geben.

#### DLR-Know-how zum Weltraumwetter

Seit der Jahrtausendwende veranstaltet das DLR nationale Weltraumwetter-Workshops und schafft so eine Bühne für dieses immer wichtiger werdende Thema. Im 4. Workshop wurde 2015 ein gemeinsames Positionspapier vorgeschlagen, an dem zurzeit noch gearbeitet wird. Das Dokument soll nationalen Entscheidungsträgern helfen, aktuelle Gesichtspunkte der vielschichtigen Weltraumwetter-Thematik in ihren Entscheidungen angemessen zu berücksichtigen und vorhandene nationale Ressourcen entsprechend zu nutzen.

Die stille, lebensspendende Kraft der Sonne macht Leben auf der Erde erst möglich. Die zerstörerischen Energien der gigantischen Eruptionen auf ihrer Oberfläche lassen sich im Alltag kaum erahnen. Doch die energetischen Teilchen des Sonnenwindes sind real und treffen unsere Gesellschaft an ihrem empfindlichsten Punkt: ihrer Vernetzung.

Wann wieder ein großer Sonnensturm kommt, kann niemand sagen. Dass er kommen wird, ist gewiss. Das DLR arbeitet daran, dass die Gesellschaft sich bestmöglich darauf einstellen kann.



Bild: DLR/Manuel Tennert

Dr. Jens Berdermann, theoretischer Physiker. Promotion in Astroteilchenphysik, Thema: Zustandsgleichung und Neutrino-Transport für supraleitende Quarkmaterie in Neutronensternen. Seit 2011 ist er am DLR-Institut für Kommunikation und Navigation in Neustrelitz. Er leitet die Gruppe Ionosphärische Effekte und Korrekturen und arbeitet am Aufbau des Ionosphere Monitoring and Prediction Center (IMPC).

### Fünf Fragen an Dr. Jens Berdermann

1. **„Mein Job bedeutet für mich ...“**
  - ... täglich neue Herausforderungen und interessante Forschungsarbeit. Aber auch anwendungsorientierte Wissenschaft.
2. **„Wenn ich eine Antwort auf eine wissenschaftliche Frage bekommen könnte, dann wäre meine Frage ...“**
  - Hm, schwierig ... (überlegt). Allgemein vielleicht: Woraus besteht das Universum? Was war vor dem Urknall? Schwer, sich hier auf eine Frage begrenzen zu müssen. In meinem Arbeitsumfeld würde mich interessieren, wie stark ein Sonnensturm maximal werden kann und worauf wir uns im Extremfall einstellen müssen.
3. **„Wenn ich in den Himmel schaue, sehe ich ...“**
  - ... Wolken? (lacht) Nein, ich bewege mich im Alltag (noch) ganz normal, ohne dass ich den Kopf ständig in den Himmel gerichtet habe ...
4. **„Wenn ich mich nicht mit Weltraumwetter beschäftigen würde, dann würde ...?“**
  - ... ich mir bestimmt ein anderes spannendes Gebiet der Physik erschließen.
5. **„In 30 Jahren ist die Weltraumwetter-Forschung so weit, dass ...?“**
  - ... das Weltraumwetter wie das Erdwetter verstanden wird. Die größten Fortschritte sehe ich im Bereich der physikalischen Modellierung mit Datenassimilation und Vorhersage. Ich hoffe, dass wir noch mehr direkte Beobachtungsdaten haben werden und all diese satelliten-, aber auch bodengestützten Daten in ein physikalisches Modell integrieren können. Dadurch wird es möglich, zeitlich und räumlich präzisere Vorhersagen über den Zustand der Ionosphäre zu treffen und Störungen viel genauer vorherzusagen.

### GLOSSAR

- SOHO** – Solar and Heliospheric Observatory: Europäisch-amerikanisches Sonnenobservatorium, das Daten über das Sonneninnere, die Sonnenatmosphäre, die Korona und den Sonnenwind liefert.
- ACE** – Advanced Composition Explorer: NASA-Satellit, der den Sonnenwind sowie solare, interplanetare und kosmische Partikel analysiert und die Daten in die USA, nach Japan und zum DLR nach Neustrelitz übermittelt.
- DSCOVR** – Deep Space Climate Observatory: Misst die Stärke des Sonnenwindes sowie des interplanetaren Magnetfelds und bestimmt dessen Orientierung. Zusätzlich wird die rückgestreute Strahlung auf der sonnenbeschienenen Seite der Erde untersucht.
- GPS** – Global Positioning System: Weltweites Satellitensystem, das in 20.000 Kilometer Höhe stationiert ist und der Ortung und Navigation auf der Erde dient.

Bild: NASA/SDO and the AIA, EVE, and HMI science teams