

Sonnenstürme und -aktivität: Antworten auf die zehn wichtigsten Fragen

1. Was ist ein Sonnensturm und wie entsteht er?

Die Sonne sendet ständig Strahlung und geladene Teilchen in den Weltraum. Diesen stetigen Teilchenstrom bezeichnet man als Sonnenwind. Von einer **Sonneneruption** spricht man, wenn dieser Strom für kurze Zeit und in einem begrenzten Gebiet deutlich stärker ist als sonst. Die Strahlung und die Teilchen, die bei einer Sonneneruption entstehen, bewegen sich durchs All und können auch auf die Erde treffen. Die Folgephänomene, die dort in Gang gesetzt werden, bezeichnet man als **Sonnensturm**.

Ausgangspunkt für Sonneneruptionen sind Gebiete hoher magnetischer Feldstärke in den äußersten Schichten der Sonne, der so genannten Chromosphäre und der so genannten Korona. Normalerweise sind die magnetischen Feldlinien dort bogenförmig geschlossen und schließen das heiße Sonnenplasma – also Protonen, Elektronen und weitere elektrisch geladene Atome – ein. Es kann jedoch geschehen, dass die Feldlinien aufbrechen und eine Plasmawolke eruptiv ins All entweicht. Ein solches Umordnen der Feldlinien führt in der Regel zu drei, klar unterscheidbaren Phänomenen, die in ihrer Gesamtheit eine Sonneneruption ausmachen:

1. Erste Auswirkung einer solchen Umordnung der Feldlinien sind **hochenergetische Teilchen** (vor allem Protonen), die mit Geschwindigkeiten von etwa 10 bis 20 Prozent der Lichtgeschwindigkeit die Sonne verlassen. Falls sie in Richtung der Erde ausgesendet werden, benötigen sie etwa eine Stunde, um die Erde zu erreichen.
2. Da die hochenergetischen Teilchen von ihrem Entstehungsort etwas oberhalb der Sonnenoberfläche zunächst in entgegengesetzte Richtungen ausgestoßen werden, trifft ein Teil auch die Sonne selbst. Dort werden sie abgebremst. Die Bewegungsenergie, die sie dabei

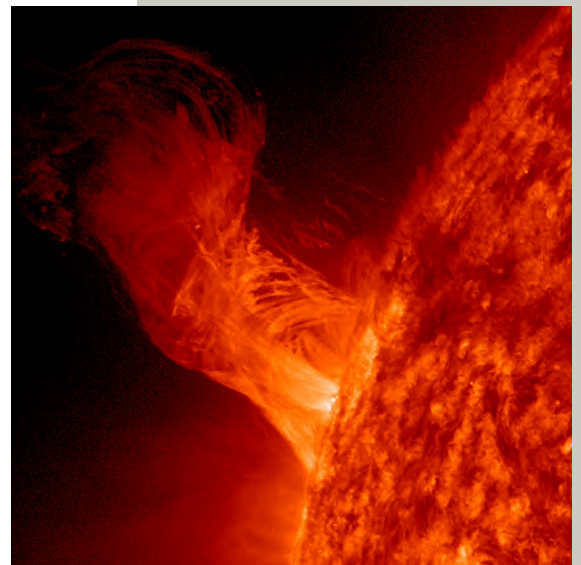
verlieren, geben sie in Form von Röntgenstrahlung ab: Es kommt zu einem **Röntgenblitz**. Wissenschaftler sprechen von einem **Flare**. Da sich der Röntgenblitz mit Lichtgeschwindigkeit ausbreitet, erreicht er noch vor den hochenergetischen Teilchen etwa acht Minuten nach der Sonneneruption die Erde. Von der Erde aus betrachtet, ist er somit das erste Anzeichen eines bevorstehenden Sonnensturms.

3. Die **Plasmawolke**, die ins All entweicht, bezeichnen Wissenschaftler als **koronalen Massenausstoß** (englisch: coronal mass ejection; Abkürzung: **CME**). Er besteht aus geladenen Teilchen: Elektronen, Protonen und weiteren Atomkernen. Die Plasmawolke bewegt sich mit Geschwindigkeiten von etwa 1000 Kilometern pro Sekunde durchs All und benötigt somit etwa ein bis zwei Tage, bevor sie die Erde erreicht. Die Plasmawolke ist für viele der Auswirkungen, die bei einem Sonnensturm auf der Erde beobachtet werden können, verantwortlich (siehe Frage 4). Obwohl die Masse einer solchen Plasmawolke der eines veritablen Bergrückens (etwa des Brockenmassivs im Harz) entsprechen kann, ist sie dünner verteilt als die Masse in einem Hochvakuum. Stünde man (in einer Art Gedankenexperiment) mitten in der Wolke, würde man sie nicht wahrnehmen.

Diese drei Phänomene treten oft gemeinsam auf. Es kann jedoch auch zu Flares kommen, die nicht von einem CME begleitet werden - und umgekehrt.

A Diese Sonneneruption beobachtete die Raumsonde Solar Dynamics Observatory am 31. Dezember 2012.

Bild: NASA



2. Wie wahrscheinlich ist es, dass eine Sonneneruption Auswirkungen auf die Erde hat?

Nicht sehr wahrscheinlich. Sonneneruptionen können an fast jeder Stelle der Sonnenoberfläche (außer den Polen) entstehen. Von dort breiten sie sich zunächst vorwiegend in radialer Richtung ins All aus und beschreiben dann eine leichte Rechtskurve. (Dies hängt mit der Rotation der Sonne zusammen. Die Flugbahn des Wasserstrahls eines rotierenden Rasensprengers sieht ähnlich aus.) Da die Sonne etwa 200 Mal so groß ist wie die Erde und der Abstand zwischen beiden Körpern mit 150 Mil-

lionen Kilometern beträchtlich ist, füllt die Erde aus Sicht der Sonne nur einen recht kleinen Raumwinkel aus. Die Wahrscheinlichkeit, dass sich die Auswirkungen einer bestimmten Sonneneruption in Richtung der Erde ausbreiten und es dort zu einem Sonnensturm kommt, ist somit nicht sehr groß. In der Vergangenheit kam es innerhalb eines jeweils elfjährigen Sonnenzyklus zu etwa zwei bis fünf schweren Stürmen auf der Erde. Schwächere Stürme treten häufiger auf.

3. Wie werden Sonnenstürme klassifiziert?

Die Stärke eines Sonnensturms wird in drei Kategorien angegeben. Diese sind nach den Auswirkungen, die die verschiedenen Komponenten des Sonnensturms auf der Erde haben, benannt:

R: Radiostörungen (ausgelöst durch den Röntgenblitz)

S: Strahlungseffekte (ausgelöst durch die hochenergetischen Teilchen)

G: geomagnetische Effekte (ausgelöst durch die Plasmawolke)

Die Stärke wird in allen drei Kategorien in fünf Stufen eingeteilt. Dabei entspricht die Stufe 5 einem sehr starkem Effekt, die Stufe 1 einem schwachen.

Eine weitere Klassifizierung beschreibt allein die Stärke eines Flares in den

fünf Kategorien A, B, C, M und X. Dabei bezeichnet A einen schwachen, X einen sehr starken Flare. Ausschlaggebend ist der maximale Röntgenfluss, der erreicht wird. Die Skala von A bis X ist logarithmisch. Ein Flare der Klasse B ist somit zehnmal so stark wie ein Flare der Klasse A. Eine zusätzliche Zahl gibt eine (nicht-logarithmische) Feinabstufung der Stärke innerhalb einer Klasse an. Den schwächsten Flare innerhalb der Klasse M bezeichnet man mit „M1“, einen sehr starken mit „M9“. Ein M10-Flare entspricht einem X1-Flare. Bei Flares, deren Stärke X10 übersteigt, zählt man innerhalb der Klasse X einfach weiter. Der stärkste bis heute registrierte Flare trat am 4. November 2003 auf und wurde mit X28 klassifiziert.

4. Welche Auswirkungen können Sonnenstürme auf der Erde haben?

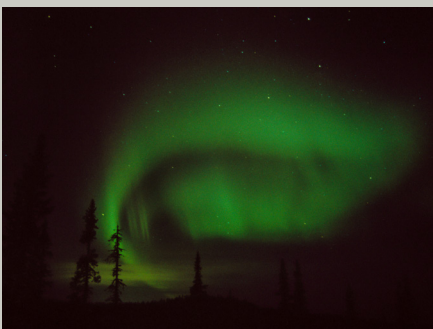
Die Erde ist weitestgehend durch ihre Atmosphäre und ihr Magnetfeld vor Sonnenstürmen geschützt. Dieses führt eintreffende, geladene Teilchen in einem Abstand von etwa zehn Erdradien (70 000 Kilometern) um die Erde herum. Zusätzlich schirmt die Atmosphäre die Erdoberfläche ab. In großen Höhen und in den Polargebieten, wo die Feldlinien des Magnetfeldes stärker gegen die Erdoberfläche geneigt sind, ist dieser Schutz schwächer. Diese Regionen sind deshalb anfälliger für die Auswirkungen von Sonnenstürmen.

Polarlichter: Trifft die Plasmawolke auf das irdische Magnetfeld, wird dieses verformt. Dadurch werden elektrische Spannungen in der Atmosphäre induziert. Zudem werden die elektrisch geladenen Teilchen in der Magnetosphäre (dem Gebiet, das durch das Erd-

magnetfeld geprägt wird) beschleunigt und können parallel zu den Feldlinien des Erdmagnetfeldes tiefer in die Erdatmosphäre eindringen. Dort stoßen sie auf das dichtere Atmosphärenengas und regen – wie in einer Leuchtstoffröhre – einzelne Gasteilchen zum Leuchten an. Diese Leuchterscheinungen treten überwiegend in den Polargebieten auf. Starke Sonnenstürme können das Erdmagnetfeld jedoch so stark verformen, dass diese Prozesse auch in niedrigeren Breiten vorkommen und Polarlichter auch in Deutschland sichtbar werden.

Auswirkungen auf den Flugverkehr: Auch in einer typischen Reiseflughöhe von elf Kilometern sind Flugreisende weitestgehend durch das Magnetfeld der Erde vor einer deutlich erhöhten Strahlungsdosis geschützt. Da dieser Schutz in den Polarregionen schwächer

B Besonders in Regionen hoher Breite können Sonnenstürme Polarlichter auslösen. Foto: Peter Barthol



und möglicherweise auch die Navigation beeinträchtigt ist, kann es sinnvoll sein, bei starken Sonnenstürmen Polar-routen vorsichtshalber zu meiden.

Auswirkungen auf Stromnetze: Auch in der Nähe des Erdbodens kann das Verformen des irdischen Magnetfeldes elektrische Feldstärken von mehreren Volt pro Kilometer induzieren. Zwar sind die Feldstärken deutlich geringer als solche, die etwa lokal bei einem Blitz auftreten. Da Stromleitungen zuweilen weite Strecken überbrücken, können sich in ihnen jedoch hohe Spannungen aufbauen und starke Ströme fließen. Diese können beispielsweise Transformatoren zerstören. Durch Folgefehler können weitere Teile des Stromnetzes ausfallen. Solche Effekte treten vor allem in hohen Breiten auf.

Auswirkungen auf Handynetze: Die Richtfunkstrecken der Handynetze sind kaum betroffen.

Auswirkungen auf Satelliten: Vor allem die hochenergetischen Teilchen eines Sonnensturms können die Funktionstüchtigkeit von Satelliten beeinträchtigen. Zum einen können die Teilchen die Sternensensoren blenden. Diese Sensoren machen bestimmte Sternbilder am Himmel aus und erlauben es dem Satelliten, sich gezielt auszurichten. Zum anderen können die Teilchen freie Ladungen in elektronischen Bauteilen des Bordcomputers erzeugen, so dass es zu Abstürzen der Software kommen kann. Dies lässt sich jedoch durch Ab- und Wiedereinschalten des Computers beheben. Die Solarzellen, welche den Satelliten

mit Strom versorgen, und andere elektronische Bauteile können dauerhaft geschädigt werden. Die Solarzellen der Raumsonde SoHO etwa haben seit ihrem Start im Jahre 1995 durch Sonnenstürme etwa 25 Prozent ihrer Leistung eingebüßt. Zudem heizt die energiereiche Strahlung die äußersten Schichten der Erdatmosphäre auf. Als Folge dehnt sie sich aus – zum Teil bis zu den Umlaufbahnen einiger Satelliten. Diese werden durch den Wiedereintritt in die Atmosphäre abgebremst. Damit sie nicht abstürzen, muss gegengesteuert werden.

Auswirkungen auf Astronauten: Astronauten sind außerhalb der Erdatmosphäre nicht vor den Auswirkungen eines Sonnensturms geschützt. Bei starken Sonnenstürmen ist die Strahlungs-dosis selbst im Inneren einer Raumsonde hoch; bei Weltraumspaziergängen kann sie lebensgefährlich sein. Besonders bei möglichen, zukünftigen bemannten Weltraummissionen zum Mond oder zum Mars stellen Sonnenstürme eine ernste Gefahr dar.

Auswirkungen auf das GPS: Besonders in höheren Breiten bewirken Sonnenstürme, dass die Erdatmosphäre in etwa 100 bis 150 Kilometern Höhe stärker als sonst ionisiert wird. Die Kommunikationssignale der GPS-Satelliten, die auf ihrem Weg zu unseren GPS-Geräten diese Schicht durchqueren müssen, werden dadurch geringfügig verzögert. Da die GPS-Geräte ihren Standort aus der Laufzeit dieses Signals ermitteln, kann es zu Fehlberechnungen kommen.

5. Lassen sich Sonnenstürme vorhersagen?

Nein. Es ist nicht möglich zu berechnen, wann und wo es auf der Sonne zu einer Sonneneruption kommt. Eine langfristige Vorhersage von Sonnenstürmen ist somit nicht möglich. Allerdings lässt sich die Zeit, die zwischen dem Auftreten der Eruption auf der Sonne

und dem Eintreffen des Sturms auf der Erde liegt, recht genau bestimmen. Die Plasmawolke trifft in der Regel erst nach ein bis zwei Tagen auf der Erde ein. Eine kurzfristige Vorwarnung ist somit möglich.

6. Gibt es eine Art Frühwarnsystem für Sonnenstürme?

Ja. Mehrere Raumsonden und Satelliten beobachten die Sonne ständig aus dem All. Das erste Anzeichen eines Sonnensturms, der Röntgenblitz (siehe Frage 1), zeichnen beispielsweise die Erdsatelliten GOES sowie die Raumsonden SoHO (Solar and Heliospheric Observatory), STEREO und SDO (Solar Dynamics Observatory) auf. Zusammen

mit den Daten weiterer Sonden lassen sich dann Ausbreitungsrichtung und -geschwindigkeit des Sonnensturms bestimmen. Vorhersagen dieser Art bietet etwa das Space Weather Prediction Center (SWPC) der National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). Die NOAA ist eine Bundesbehörde der USA.



C Während eines Weltraumspaziergangs sind Astronauten nicht genügend vor der hohen Strahlungs-dosis, die bei einem starken Sonnensturm auftreten kann, geschützt.

Bild: NASA

7. Was haben Sonnenstürme mit der Aktivität der Sonne zu tun?

Die Sonne ist ein sehr dynamischer Stern: Phasen zunehmender Aktivität wechseln sich mit Phasen abnehmender Aktivität ab. Ein Maß für die Aktivität der Sonne ist beispielsweise die Anzahl der dunklen Sonnenflecken, die sich an ihrer sichtbaren Oberfläche zeigen. Ist die Sonne besonders aktiv,

sind diese Gebiete besonders zahlreich. In Zeiten hoher Sonnenaktivität kommt es zudem zu besonders vielen und besonders heftigen Sonnenstürmen. Sonnenstürme – auch sehr starke – können jedoch vereinzelt auch im Aktivitätsminimum auftreten.



D Ein Maß für die Aktivität der Sonne ist die Anzahl der dunklen Flecken auf der Sonnenoberfläche. Diese Aufnahme stammt vom August 2011. *Bild: NASA*

8. Lässt sich die Aktivität der Sonne vorhersagen?

Nur grob und mit einer gewissen Unsicherheit. Im Schnitt treten Aktivitätsmaxima und -minima alle elf Jahre auf. Die Abfolge eines Maximums und eines Minimums bezeichnet man als Sonnenzyklus. Er entspricht der Zeit, die das globale Magnetfeld der Sonne benötigt, um sich umzupolen. Ursache dieser Prozesse sind Strömungen im Sonneninneren. Die elfjährige Dauer eines Sonnenzyklus ist jedoch nicht als strenges Naturgesetz zu verstehen, sondern eher als grobe Faustformel, die auf Erfahrungen und Aufzeichnungen der vergangenen Jahrzehnte beruht. Einzelne Sonnenzyklen können durchaus deutlich länger oder kürzer

als elf Jahre sein. Ein Beispiel ist das letzte Aktivitätsminimum: Anders als erwartet nahm die Aktivität der Sonne 2008/2009 nicht wieder zu. Stattdessen verharrte die Sonne bis Ende 2010/Anfang 2011 in einem Zustand geringer Aktivität. Präzise Prognosen, wie lange der momentane Sonnenzyklus sein und wann er sein Maximum erreichen wird, sind deshalb nicht möglich. Bestenfalls lässt sich eine grobe Erwartung formulieren. Die meisten Wissenschaftler erwarten das Maximum des derzeitigen Zyklus Ende 2013 oder Anfang 2014. Auch die genaue Stärke eines Aktivitätsmaximums lässt sich nicht mit Sicherheit vorhersagen.

9. In welchem Aktivitätszustand befindet sich die Sonne derzeit?

Nachdem die Sonne Ende 2010 ihr Aktivitätsminimum durchschritten hat, nimmt ihre Aktivität nun wieder zu. Bisher scheint der Anstieg jedoch etwas schwächer zu verlaufen, als in den vorangegangenen Sonnenzyklen. Ein Hinweis dafür ist etwa die Magnetfeldstärke innerhalb der Sonnenflecken. Diese ist derzeit geringer als in den Zyklen zuvor. Es ist deshalb zu erwarten, dass die Aktivität der Sonne auch in den nächsten Jahren hinter der

Aktivität, die etwa in den 60er Jahren erreicht wurde, zurückbleiben wird. Dem etwa elfjährigen Sonnenzyklus sind möglicherweise zudem noch deutlich längere Schwankungen überlagert: etwa der 80-90-jährige Gleißberg-Zyklus. Betrachtet man auch noch längere Entwicklungen, befindet sich die Sonne seit Mitte des 20. Jahrhunderts in einer Phase ungewöhnlich hoher Aktivität.

10. Wo gibt es weitere Informationen?

Informationen über den aktuellen Stand des Weltraumwetters und Warnungen gibt das Space Weather Prediction Center (SWPC) des National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) heraus. Das NOAA ist eine Bundesbehörde der USA.

- Messdaten der letzten Sonneneruptionen zusammengestellt vom Lockheed Martin Solar & Astrophysics Laboratory:
http://www.lmsal.com/solarsoft/latest_events/

Nützliche Links:

- Aktuelle Warnungen des SWPC:
http://www.swpc.noaa.gov/alerts/warnings_timeline.html
- aktuelle Messungen der Röntgenstrahlung des SWPC:
http://www.swpc.noaa.gov/rt_plots/xray_1m.html

Werner Curdt, Bernd Inhester,
Birgit Krummheuer
Max-Planck-Institut für
Sonnensystemforschung
Max-Planck-Straße 2
37191 Katlenburg-Lindau
<http://www.mps.mpg.de>