

# SOLARE SUPERSTÜRME – die verkannte Gefahr

Wiederholt sich der große Sonnensturm von 1859, drohen Milliarden-schäden an Satelliten und Stromversorgungsnetzen. Denn noch schützen wir uns nur unzureichend gegen geomagnetische Störungen, obwohl bereits Ausbrüche mittlerer Stärke die globale Energie- und Kommunikationsinfrastruktur in Mitleidenschaft ziehen können.

🔊 Diesen Artikel können Sie als Audiodatei beziehen; siehe [www.spektrum.de/audio](http://www.spektrum.de/audio)  
Hören Sie dazu auch unseren Podcast **Spektrum Talk** unter [www.spektrum.de/talk](http://www.spektrum.de/talk)

## In Kürze

- ▶ **Der Sonnensturm von 1859** war der stärkste, der je aufgezeichnet wurde. Bis tief nach Italien und in die Karibik waren Polarlichter zu sehen, Magnetkompasser spielten verrückt und Telegrafensysteme fielen aus.
- ▶ Eisbohrkerne deuten darauf hin, dass derartige Ausbrüche solarer Teilchen **im Mittel nur alle 500 Jahre** vorkommen. Aber schon ein Sturm, wie er alle 50 Jahre auftritt, könnte zum Verlust von Satelliten führen, Radiosender stören und kontinentübergreifende Stromausfälle verursachen.
- ▶ Um Folgekosten in Milliardenhöhe zu vermeiden, müssen wir die Sonne systematischer als bisher beobachten und **Schutzmaßnahmen für Satelliten und Stromnetze** verbessern.

Von Sten F. Odenwald und James L. Green

**U**nerwartet bescherte die Nacht vom 28. auf den 29. August 1859 vielen Menschen eine völlig neue, fremdartige Erfahrung: das geisterhafte Leuchten von Polarlichtern, die sich als helle Vorhänge aus Licht über den Himmel erstreckten. Selbst fern polarer Breiten wie in Rom und Havanna richteten sich verwunderte oder entsetzte Blicke gen Himmel – so mancher glaubte an jenem Sonntag, seine Stadt stünde in Flammen. Auch Logbücher von Schiffen, die zu dieser Zeit in Äquatornähe kreuzten, beschreiben purpurfarbene Leuchterscheinungen, die bis zur halben Zenithöhe reichten. Messinstrumente überall auf der Welt, die sonst nur winzige Änderungen des Erdmagnetfelds registrieren, schlugen plötzlich wild aus.

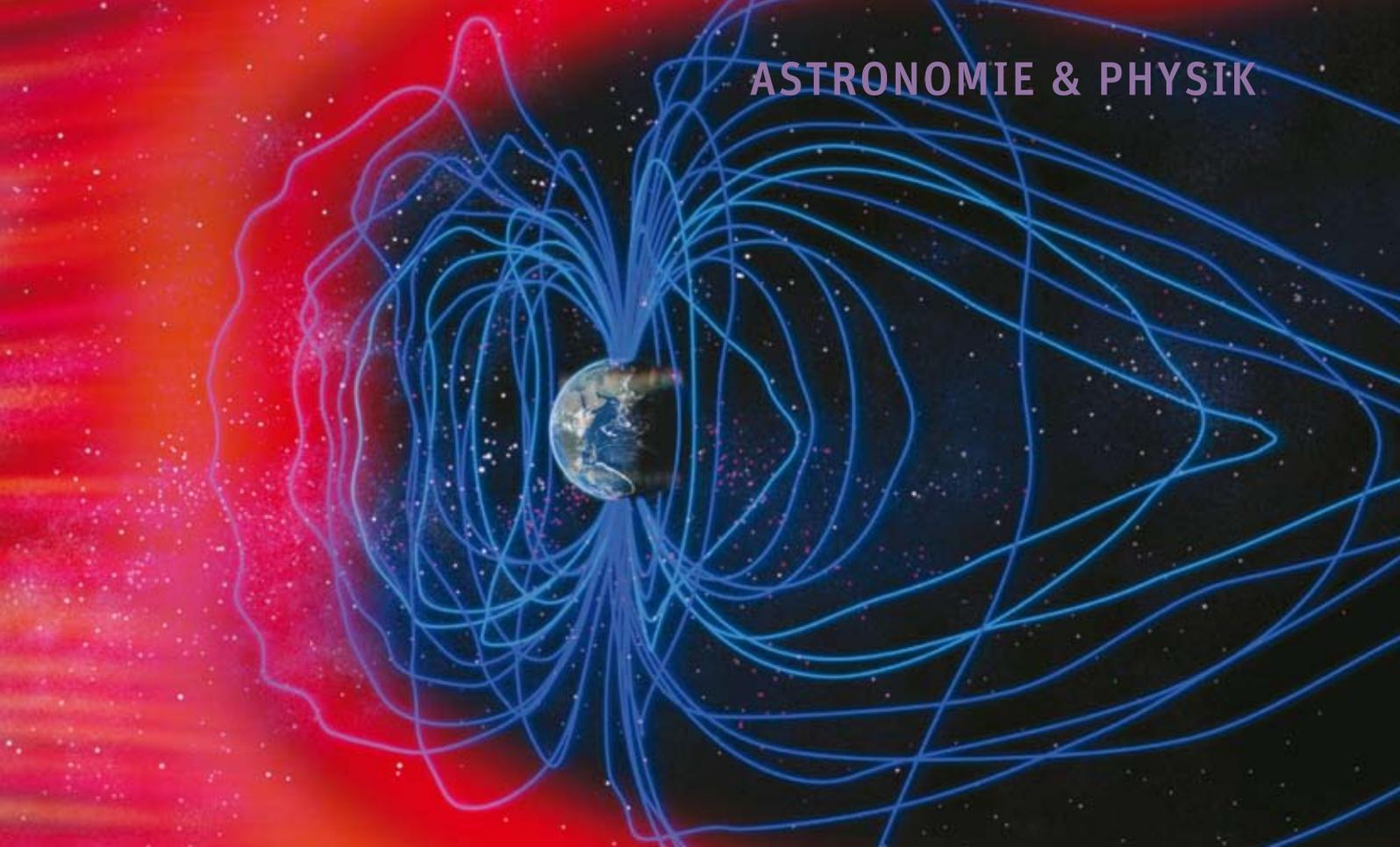
Doch dies war nur der erste Teil des Spektakels. Am 1. September beobachtete der englische Astronom Richard C. Carrington kurz vor Mittag eine Gruppe enorm großer Sonnenflecken. Während er sie skizzierte, registrierte er um 11.18 Uhr einen intensiven weißen Lichtblitz, der von zwei Orten in der Fleckengruppe ausging – ein Phänomen, das rund fünf Minuten andauerte. 17 Stunden später machte eine zweite Welle rötlicher und grünlicher Polarlichter die Nacht zum Tag,

selbst noch in so südlichen Regionen wie Panama. Und überall in Europa und Nordamerika brachen die Telegrafennetze zusammen.

Was war passiert? Nicht einmal die Wissenschaftler selbst, bedrängt von Reportern auf der Suche nach einer Erklärung, konnten eindeutige Auskunft über die Himmelslichter geben. Handelte es sich um meteoritische Materie aus dem All, um Licht, das an polaren Eisbergen reflektiert wurde, oder um eine Art Blitze in großen Höhen? Zur Aufklärung trug erst der Sturm von 1859 selbst bei. Dem »Scientific American« vom 15. Oktober jenes Jahres zufolge war »eine Verbindung zwischen den Nordlichtern und den Kräften der Elektrizität und des Magnetismus nun vollständig nachgewiesen«.

Mittlerweile kennen wir dank zahlreicher Messdaten und Untersuchungen auch den Ursprung der Polarlichter, der letztlich in energiereichen Ereignissen auf der Sonne liegt. Dann und wann stößt sie gewaltige Wolken aus Plasma aus, die, wenn sie unseren Planeten erreichen, das irdische Magnetfeld durcheinanderwirbeln (siehe »Das Wüten der Welt-raumstürme« SdW 7/2001, S. 30).

Der Sonnensturm von 1859 traf auf eine vergleichsweise wenig technisierte Zivilisation. Heute wären seine Folgen dramatischer: Satelliten würden schwer beschädigt, der Funkverkehr bräche zusammen und kontinentweite



PAT RAWLINGS, SAIC

Stromausfälle würden wochenlange Reparaturarbeiten erfordern. Zwar treten Stürme dieser Stärke im Mittel nur alle 500 Jahre auf. Doch Ereignisse mit immerhin der halben Intensität geschehen bereits zehnmals häufiger. Zuletzt am 13. November 1960, als ein Sonnensturm weltweite geomagnetische Störungen verursachte und Radiosender ausfallen ließ. Trifft uns der nächste Supersturm unvorbereitet, könnte er zum kosmischen »Katrina« werden. Berechnungen zufolge lassen sich seine direkten und indirekten Folgekosten mit denen eines großen Hurrikans wie jenem vergleichen, der 2005 so zerstörerisch über die Südküste der USA fegte.

Wer wissen will, wie sich solche Stürme zusammenbrauen, muss einen genauen Blick auf die Sonne werfen. Die Anzahl der Sonnenflecken wächst und sinkt ebenso wie andere Zeichen der Sonnenaktivität in elfjährigen Zyklen. Im Januar 2008 begann der aktuelle Zyklus, bis 2013 wird die Aktivität des Zentralgestirns nun stetig zunehmen. Was im vorigen Zyklus geschah, haben Sonnenforscher lückenlos dokumentiert: Sie beobachteten 21 000 Strahlungsblitze oder »Flares« und 13 000 koronale Massenauswürfe (siehe Kurzglossar rechts). Beide sind Folgen der unaufhörlichen Turbulenzen solarer Gase. Sonnenstürme – der Begriff fasst Flares und Massenauswürfe zusammen – ähneln in mancher

Hinsicht irdischen Stürmen, besitzen allerdings eine weitaus größere Ausdehnung. Und vor allem: Auf der Sonne bestimmen nicht Druck- und Temperaturverhältnisse, sondern Magnetfelder über die Dynamik der Gase (siehe »Explosionen auf der Sonne« SdW 6/2006, S. 40, »Die rätselhafte Heizung der Sonnenkorona« 9/2001, S. 28).

## Entfesselte Kräfte

Die meisten solcher Stürme lassen allenfalls Polarlichter am irdischen Himmel tanzen. Doch gelegentlich entfesselt die Sonne vielfach größere Kräfte. Zwar hat niemand, der heute lebt, je einen solaren Supersturm mitemgemacht, doch um zu verstehen, was damals geschah, rekonstruierten wir gemeinsam mit vielen anderen Forschern die Ereignisse des großen Sturms – einerseits aus historischen Aufzeichnungen, andererseits auf Basis von Satellitendaten der letzten Jahrzehnte.

**1. Der Sturm zieht herauf.** Vor dem Supersturm von 1859 erscheint auf der Sonne, etwa auf dem Höhepunkt ihres Aktivitätszyklus, eine auffällige Sonnenfleckengruppe. Die Flecken nahe dem solaren Äquator sind so groß, dass Astronomen wie Carrington sie ohne technische Hilfsmittel (aber mit geschützten Augen) sehen. Zum Zeitpunkt des ersten koronalen Massenauswurfs – im Verlauf des Sturms wird es noch zu einem weiteren kom-

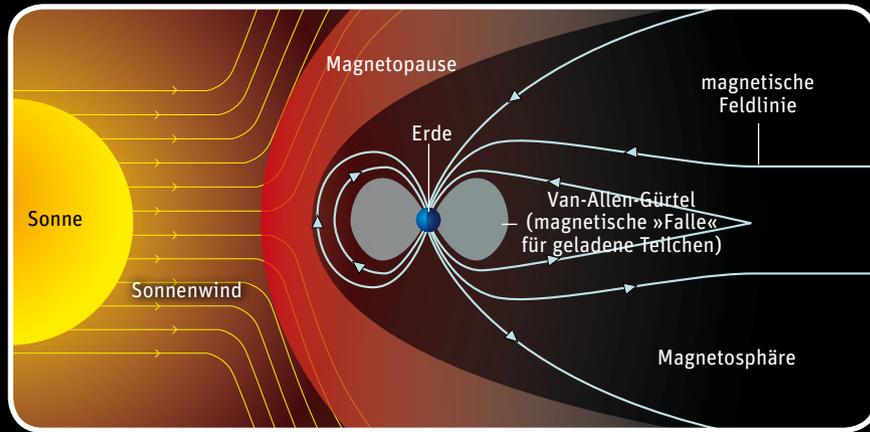
**Weltraumunwetter mit Folgen:** Wenn sich der Sonnenwind zum Sturm entwickelt und auf das irdische Magnetfeld (blaue Linien) trifft, kann dies unsere hochtechnisierte Zivilisation teilweise außer Gefecht setzen.

## LEXIKON

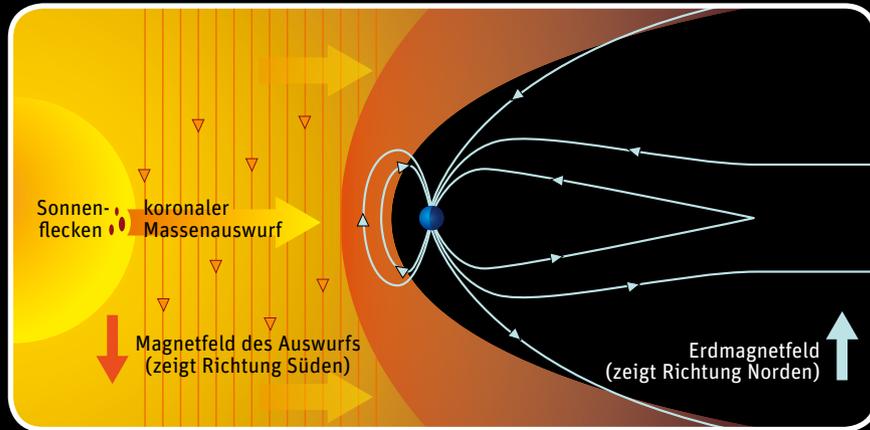
**Flares** sind Ausbrüche energiereicher Teilchen und intensiver Röntgenstrahlung, die als Folge von Magnetfeldänderungen auf relativ kleinen Skalen in der Größenordnung von einigen tausend Kilometern auftreten. **Koronale Massenauswürfe** wiederum (die Korona ist die äußere Atmosphäre der Sonne) sind magnetische Blasen, die Millionen von Kilometern durchmessen und in denen Milliarden Tonnen Plasma mit Geschwindigkeiten von mehreren Millionen Kilometern pro Stunde ins All geschleudert werden.

## WIE ES ZUM GEOMAGNETISCHEN CHAOS KOMMT

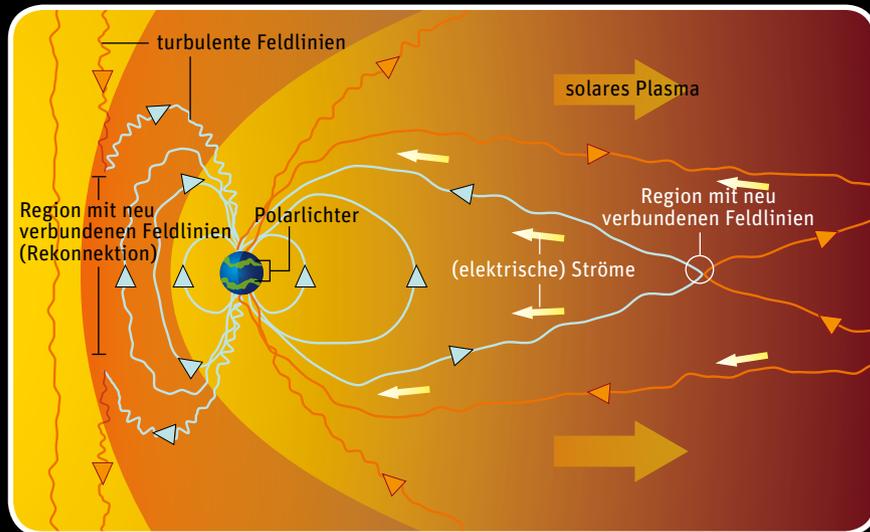
**NORMALERWEISE** lenkt das irdische Magnetfeld die geladenen Partikel ab, die von der Sonne zur Erde strömen. Die tränenförmige Raumregion, in der das irdische Magnetfeld dominiert und in der dieser Schutz wirksam ist, wird als Magnetosphäre bezeichnet. Die Grenze zwischen ihr und dem solaren Plasma, die Magnetopause, ist auf der sonnenzugewandten Seite rund 60 000 Kilometer von der Erdoberfläche entfernt. Eine zusätzliche magnetische »Falle« für geladene Teilchen ist der torusförmige Van-Allen-Gürtel.



**ZIEHT EIN SONNENSTURM** in Form eines koronalen Massenauswurfs herauf, rast eine Blase ionisierten Gases auf die Erde zu, staucht die irdische Magnetosphäre und passiert unseren Planeten mit Überschallgeschwindigkeit. In extremen Fällen wird die Magnetopause sogar in den Van-Allen-Gürtel hineingeschoben, der dadurch vorübergehend verschwindet.



**WEIL DAS SOLARE GAS SEIN EIGENES MAGNETFELD MIT SICH FÜHRT**, bringt es das irdische Magnetfeld in Unordnung. Zeigen beide in entgegengesetzte Richtung, kommt es zur Rekonnexion: Beide Felder verbinden sich miteinander, wobei magnetische Energie frei wird. Diese kann Teilchen auf hohe Geschwindigkeiten beschleunigen und dadurch helle Polarlichter hervorbringen, aber auch starke elektrische Ströme erzeugen.



ILLUSTRATIONEN: MELISSA THOMAS; SONNENLECKEN: CARNegie INSTITUTION OF WASHINGTON; KORONALER MASSENAUSWURF UND RÖNTGEN-FLARE: SOHO/NASA

## DER SUPERSTURM VON 1859

So haben ihn die Autoren rekonstruiert. Die Koordinierte Weltzeit (UTC) entspricht fast genau der Mittleren Greenwich-Zeit (GMT).

### 26. AUGUST

Auf der Sonne erscheint bei einer westlichen Länge von 55 Grad eine große Gruppe von Flecken. Vermutlich kommt es jetzt zu einem ersten koronalen Massenauswurf.



SONNENFLECKEN

### 28. AUGUST

Der Massenauswurf erreicht die Erde, sein Magnetfeld ist nach Norden gerichtet.

### 28. AUGUST 7.30 UTC

Das Greenwich Magnetic Observatory registriert Störungen, die auf eine Stauchung der Magnetosphäre hindeuten.



KORONALER MASSENAUSWURF

### 28. AUGUST 22.55 UTC

Die Hauptphase des Sturms beginnt. Jetzt treten starke magnetische Störungen, Unterbrechungen der Telegrafverbindungen und Polarlichter bis zu einer magnetischen Breite von 25 Grad Nord auf.



SICHTUNGEN VON POLARLICHTERN

### 30. AUGUST

An diesem Tag enden die durch den ersten koronalen Massenauswurf ausgelösten geomagnetischen Störungen.

### 1. SEPTEMBER 11.18 UTC

Der Astronom Richard C. Carrington und andere beobachten einen weiß leuchtenden Strahlungsblitz (Flare) auf der Sonne. Die große Fleckengruppe hat sich nach 12 Grad West weiterbewegt.

### 2. SEPTEMBER 5.00 UTC

Die Magnetfeld-Observatorien von Greenwich und Kew registrieren Störungen, denen unmittelbar ein geomagnetisches Chaos folgt. Binnen 17 Stunden erreicht ein zweiter koronaler Massenauswurf die Erde. Seine Geschwindigkeit beträgt 2380 Kilometer pro Sekunde, sein Magnetfeld ist nach Süden gerichtet. Helle Nordlichter erscheinen bis zu einer magnetischen Breite von 18 Grad Nord.



RÖNTGEN-FLARE

### 3. UND 4. SEPTEMBER

Die Hauptphase der geomagnetischen Störungen durch den zweiten Auswurf endet. Am Himmel sind noch einzelne Polarlichter mit deutlich verringelter Intensität zu sehen.



SICHTUNGEN VON POLARLICHTERN

men – steht die Fleckengruppe der Erde genau gegenüber, hat sie also gewissermaßen im Fokus. Dabei müsste die Sonne nicht einmal sonderlich genau zielen, denn sobald ein Massenauswurf die Erdbahn erreicht, hat er sich zumeist auf gut 50 Millionen Kilometer und damit auf eine Breite von einem Mehrtausendfachen des Erddurchmessers ausgedehnt.

**2. Der erste Treffer.** Der erste Massenauswurf benötigt vermutlich 40 bis 60 Stunden, um die Erde zu erreichen. Magnetometerdaten von 1859 deuten auf eine spiralförmige Struktur des Magnetfelds im ausgeworfenen Plasma hin. Als das ionisierte Gas zum ersten Mal die Erde trifft, zeigt sein Feld nach Norden. Dadurch verstärkt es das irdische Magnetfeld, was die Folgen gering hält. Gleichzeitig aber staucht es die Magnetosphäre, also die Raumregion, in der das irdische Magnetfeld über das der Sonne dominiert. Zu diesem Zeitpunkt registrieren die Magnetometer den Beginn eines magnetischen Sturms.

Doch während das Plasma weiter an der Erde vorbeiströmt, dreht sich das Feld allmählich. 15 Stunden später zeigt es genau in die dem irdischen Magnetfeld entgegengesetzte Richtung. Dabei kommt es zu einem magnetischen »Kurzschluss«, einer Rekonnektion: Die nach Norden zeigenden Feldlinien des Erdmagnetfelds und die nach Süden zeigenden Feldlinien des Plasmas berühren einander, verbinden sich und nehmen eine energieärmere Konfiguration ein. Dabei setzen sie große Energien frei, womit die Störungen der Telegrafen und das Auftreten der Polarlichter ihren Anfang nehmen. Erst ein bis zwei Tage später, als das Plasma die Erde passiert hat, normalisiert sich das geomagnetische Feld wieder.

**3. Das Röntgen-Flare.** Die größten koronalen Eruptionen gehen typischerweise mit einem oder mehreren intensiven Flares einher. Der Strahlungsblitz, den Carrington und andere am 1. September im optischen Bereich beobachteten, deutet auf Temperaturen von fast 50 Millionen Kelvin und damit auf enorme Energiemengen hin, die in der Sonnenatmosphäre frei werden. Dabei muss neben sichtbarem auch Röntgen- und Gammastrahlung abgestrahlt worden sein. Nach achteinhalb Minuten treffen die energiereichen Photonen auf der Erde ein und übertragen Energie in die Ionosphäre. Hätte es damals schon Kurzwellenempfänger gegeben, wären sie dadurch nutzlos geworden. Denn an dieser hochatmosphärischen Schicht aus ionisiertem Gas wird kurzwellige Radiostrahlung normalerweise zurück zum Erdboden reflektiert, nun aber wird sie immer stärker absorbiert. Die Energie der Röntgenstrahlung heizt außerdem die obere Atmosphäre auf, die sich dadurch um meh-

## ES REGNET PROTONEN

Solare Protonenereignisse sind **Schauer energiereicher Protonen**, die gelegentlich zusammen mit Flares und koronalen Massenauswürfen auftreten. Sie können Datenspeicher und elektronische Schaltkreise in Satelliten zerstören, belasten aber auch Astronauten und Flugpassagiere mit einer zusätzlichen Strahlungs-dosis.

Die energiereichsten Protonen erzeugen in der Atmosphäre auch sekundäre Neutronen, die bis auf den Erdboden gelangen und sich dort als *ground level events* von entsprechenden Instrumenten detektieren lassen. Die Gesundheit gefährden die neutralen Teilchen aber nicht.

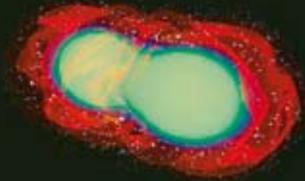
## STURMSPUREN IM EIS

Als Kenneth G. McCracken von der University of Maryland Bohrkerne aus dem Eis Grönlands und der Antarktis untersuchte und die Konzentration von im Eis eingeschlossenen Nitraten maß, stieß er auf plötzliche sprunghafte Veränderungen. In den zurückliegenden Jahrzehnten scheinen diese Sprünge mit bekannten Ereignissen auf der Sonne zu korrelieren. **Die größte Nitratanomalie**, die für die vergangenen 500 Jahre gefunden wurde, lässt sich auf das Jahr 1859 zurückführen und ist etwa äquivalent zur Summe aller größeren Ereignisse der letzten vier Jahrzehnte.

Georg Wolschin

## Facetten der Physik

Höhepunkte moderner physikalischer und astronomischer Forschung



BRASSEN

Spektrum

Georg Wolschin

**Facetten der Physik**  
*Höhepunkte moderner physikalischer und astronomischer Forschung*

Mit einem Vorwort von Peter Grünberg

Höhepunkte moderner physikalischer und astronomischer Forschung der letzten zehn Jahre werden in zahlreichen aufeinander abgestimmten Einzelbeiträgen dargestellt. Die mit aufschlussreichen Bildern und Internet-Quellen zur eigenen Recherche versehenen Essays begleiten in Form einer Chronik die Forschung und zeigen exemplarisch das Fortschreiten naturwissenschaftlicher Erkenntnis. Zum Internationalen Jahr der Astronomie 2009 liegt ein besonderer Schwerpunkt auf astrophysikalischen Themen.

266 Seiten / Format 17 x 24 cm  
geb. Ausgabe / 39,90 Euro  
ISBN 978-3-86858-060-0

SHAKER<sup>TM</sup>  
media

www.shaker-media.de



Polarlichter wie hier im isländischen Njardvik entstehen, wenn geladene Teilchen vor allem aus dem Sonnenwind mit Gasmolekülen in der Atmosphäre kollidieren. (Die Farben entsprechen den Emissionen verschiedener chemischer Elemente.) Sie treten meist in polaren Regionen auf, große Sonnenstürme lassen sie aber auch in tropischen Breiten erscheinen.

**UNBEACHTETES RISIKO**

Durch ihre Abhängigkeit von elektronischen Geräten wird die Gesellschaft immer verzichtlicher gegenüber Sonnenstürmen, was in der öffentlichen Wahrnehmung aber keine Rolle spielt. Als die Autoren Zeitungsausgaben seit den 1840er Jahren auf die Berichterstattung über **Weltraumwetter-Ereignisse** durchforsteten, stellten sie fest: In der Zeit etwa vor 1950 waren magnetische Stürme, solare Flares und ihre Folgen den Tageszeitungen aufwändige Titelgeschichten wert. In fünf Zentimeter großen Lettern titelte beispielsweise der »Boston Globe« am 24. März 1940: »U.S. Hit by Magnetic Storm« (USA von magnetischem Sturm getroffen). Seit 1950 aber werden solche Berichte in die Innenteile der Zeitungen verbannt.

rere zehn oder gar Hunderte von Kilometern ausdehnt.

**4. Der zweite Treffer.** Das Raumgebiet, durch das der erste Auswurf zog, ist nun fast frei von Plasma. Bevor der Sonnenwind, ein steter Strom geladener Partikel, es wieder auffüllen kann, feuert die Sonne aber ein zweites Mal. Diesen Massenauswurf blockiert nur noch wenig Material, so dass er schon nach 17 Stunden eintrifft. Diesmal weist sein Magnetfeld nach Süden, als es auf die Magnetosphäre der Erde trifft. Sofortiges geomagnetisches Chaos ist die Folge. Der Aufprall ist so stark, dass die in Sonnenrichtung rund 60 000 Kilometer weit reichende Magnetosphäre auf 7000 Kilometer oder möglicherweise gar bis in die obere Stratosphäre hinein gestaucht wird. Der unseren Planeten umgebende Van-Allen-Gürtel – eine torusförmige Raumregion, in der geladene Teilchen wie in einer magnetischen Falle gefangen gehalten werden – verschwindet vorübergehend. So wird eine große Zahl von Protonen und Elektronen frei, die für die intensiven roten Polarlichter weltweit verantwortlich gewesen sein könnten.

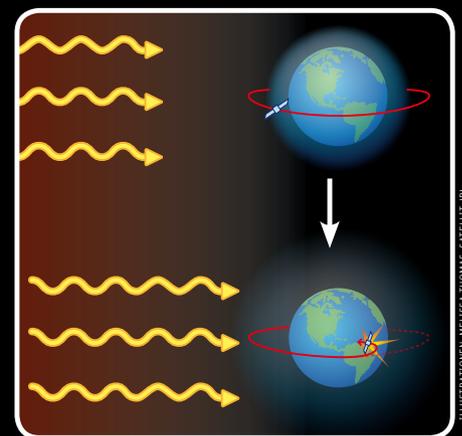
**5. Neutronenregen durch energiereiche Protonen.** Der Strahlungsblitz und die Massenauswürfe beschleunigen Protonen auf Energien von 30 Megaelektronvolt oder mehr. Im Bereich der Arktis, wo das Erdmagnetfeld am wenigsten Schutz bietet, dringen sie bis auf 50 Kilometer über der Erdoberfläche vor und laden weitere Energie in der Ionosphäre ab. Nach Berechnungen von Brian C. Thomas von der Washburn University in Topeka (Kansas) sinkt die Menge stratosphärischen Ozons dadurch um fünf Prozent. Die schnellsten Protonen mit Energien von über einer Milliarde Elektronvolt reagieren jetzt mit den Kernen von Stickstoff- und Sauerstoffatomen der Luft und setzen dabei Neutronen frei, die auf den Erdboden treffen und Nitratanomalien verursachen (siehe »Sturm Spuren im Eis«, S. 27).

**6. Starke elektrische Ströme.** Während sich die Polarlichter von den hohen Breiten, wo sie üblicherweise sichtbar sind, in südlichere Gefilde ausbreiten, induzieren die in der Ionosphäre und den Polarlichtern fließenden elektrischen Ströme auch am Erdboden starke Ströme. Sie breiten sich über ganze Kontinente aus und finden auch Wege in das Telegrafennetz, wo die Spannung zu hochgefährlichen, viele Ampère starken Entladungen führt und mehrere Telegrafennetzstationen in Brand setzt.

Letztlich aber waren die Folgen des Sturms von 1859 überschaubar. Trifft uns ein solches »Unwetter« heute erneut, drohen unheilvollere Szenarien. Am offensichtlichsten bedroht sind Satelliten, denn Sonnenstürme schaden der Energieversorgung der ohnehin empfindlichen Sonden. Schon unter normalen Umständen lassen die Partikel der kosmischen Strahlung die Solarzellen erodieren, wodurch sie jährlich etwa zwei Prozent weniger Strom erzeugen. Außerdem stören eindringende Teilchen die Elektronik. So wurde etwa der US-Kommunikationssatellit Telstar 401 im Jahr 1997 irreparabel beschädigt, und bereits 1994 hatte solare Aktivität die kanadische Sonde Anik E2 für Monate außer Kontrolle geraten lassen. Nach einer neuerlichen

**SATELLITEN IN GEFAHR**

Schon das alltägliche Weltraumwetter fordert seinen Tribut von Satelliten. Ein Supersturm aber würde binnen weniger Stunden Schäden anrichten, die dem Verschleiß während mehrerer Jahre entsprechen.



**Treffen solare Teilchen und Strahlung** auf die Erdatmosphäre, bläht sich diese auf. Für Satelliten auf niedrigen Umlaufbahnen erhöht sich dadurch die Luftreibung.

solaren Attacke im Jahr 1996 war auch ein Solarmodul ihres Schwestersatelliten Anik E1 nicht mehr zu gebrauchen – es musste fortan mit halber Energie auskommen. Generell gilt, dass starke Sonnenstürme die Lebensdauer von Satelliten binnen Stunden um ein bis drei Jahre verringern und hunderte Fehler auslösen können, von harmlosen falschen Kommandos bis hin zu zerstörerischen elektrostatischen Entladungen.

### Machtlos gegenüber den Folgen

Welche Kosten damit einhergehen könnten, zeigten wir, indem wir anhand 1000 unterschiedlicher Sturmszenarien das Schicksal speziell von Kommunikationssatelliten untersuchten. Die Intensitäten lagen dabei zwischen der des Ereignisses von 1859 und jener, die der größte Sturm im Raumfahrtzeitalter am 20. Oktober 1989 aufwies. Unter anderem fanden wir heraus, dass Satellitenbetreiber Umsatzverluste von oft über 20 Milliarden US-Dollar hinnehmen müssten, weil sie keine Kommunikationsverbindungen zur Verfügung stellen können. Dabei gingen wir allerdings von der Annahme aus, dass sie von vornherein große Ersatzkapazitäten für die Datenübertragung und eine anfänglich zehnpromtente Überschussproduktion von Energie vorsehen.

Unter weniger optimistischen Annahmen können die Verluste hingegen bis zu 70 Milliarden Dollar betragen. Das entspricht etwa dem jährlichen Umsatz aller Kommunikationssatelliten zusammengenommen. Noch gar nicht berücksichtigt sind dabei Folgekosten für die Nutzer ihrer Dienste.

Glücklicherweise sind geostationäre Kommunikationssatelliten zumindest gegenüber Sonnenstürmen einer Stärke, wie sie statistisch einmal pro Jahrzehnt auftritt, erstaunlich robust. Ihre Lebensdauer ist seit 1980 von damals knapp fünf Jahren auf jetzt fast 17 Jahre gestiegen. Außerdem bestehen ihre Solarzellen mittlerweile nicht mehr aus Silizium, sondern aus Galliumarsenid, weshalb sie leichter und effizienter, aber auch widerstandsfähiger als ihre Vorgänger sind. Und schließlich erhalten Satellitenbetreiber (ebenso wie Fluglinien) mittlerweile Sturmwarnungen, etwa vom europäischen Weltraumwetternetz SWENET oder vom Zentrum für Weltraumwettervorhersage der amerikanischen Wetter- und Ozeanografiebehörde NOAA. Letztere informiert rund 1000 US-Regierungsstellen und Firmen, so dass sie fehleranfällige Satellitenmanöver während des Sturms vermeiden können.

Doch nicht alle Folgen eines Supersturms lassen sich abmildern. Transportiert Röntgen-

### COMPUTER UNTER STROM

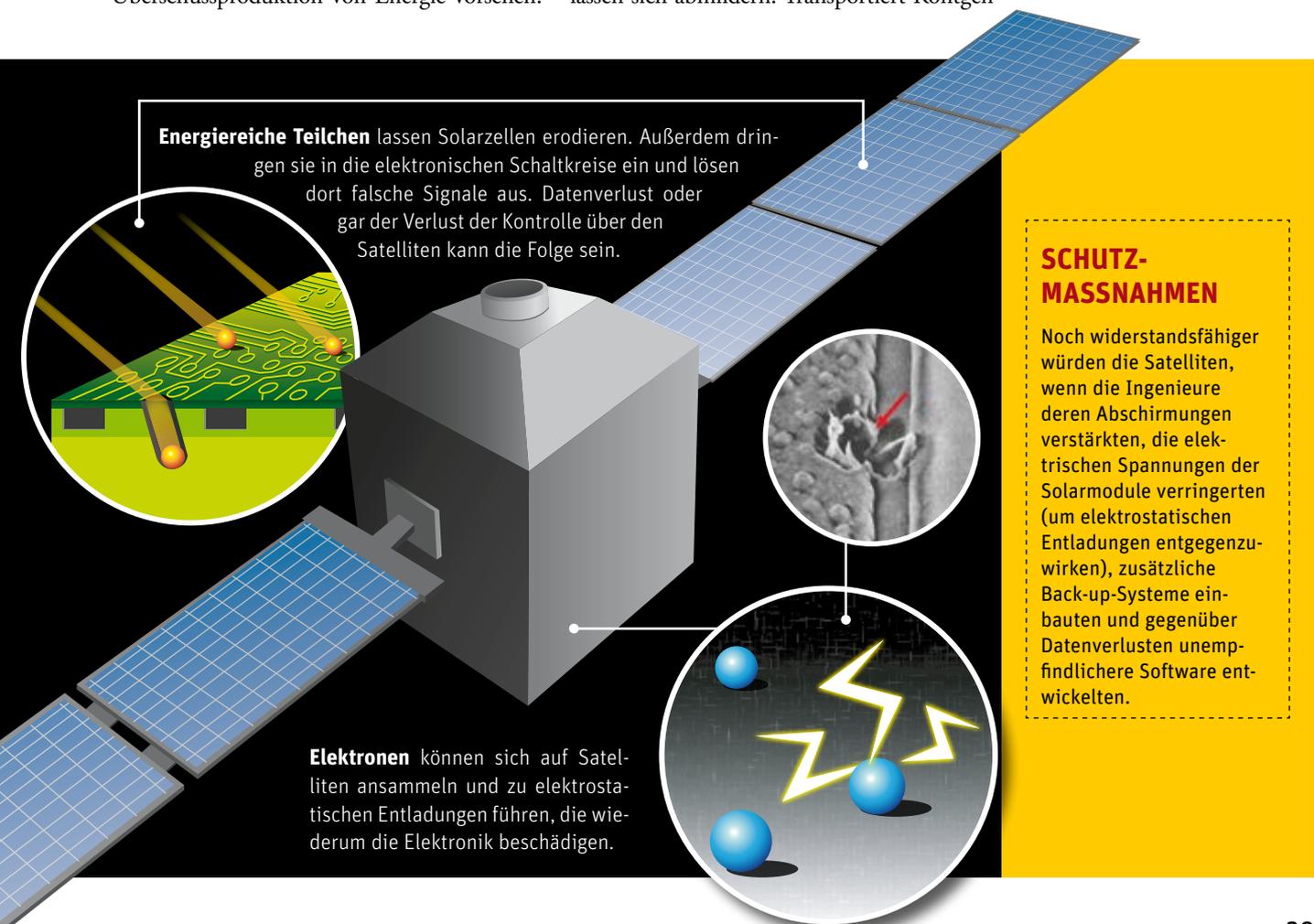
Auch elektronische Geräte leiden unter starken Sonnenstürmen, denn energiereiche Protonen von der Sonne können im Erdboden Neutronen erzeugen. Ergebnisse einer Studie des IT-Konzerns IBM aus den 1990er Jahren deuten darauf hin, dass die Sekundäreffekte kosmischer Strahlung in Computern (die in der Regel nicht abgeschirmt sind) typischerweise einen Fehler pro 256 Megabyte Arbeitsspeicher (RAM) und Monat verursachen. Die Strahlungsflüsse, die mit einem Sonnensturm einhergehen, würden weltweit also zahlreiche **Computer versagen lassen**. Ein Neustart der Geräte dürfte das Problem allerdings in den meisten Fällen beheben.

**Energierreiche Teilchen** lassen Solarzellen erodieren. Außerdem dringen sie in die elektronischen Schaltkreise ein und lösen dort falsche Signale aus. Datenverlust oder gar der Verlust der Kontrolle über den Satelliten kann die Folge sein.

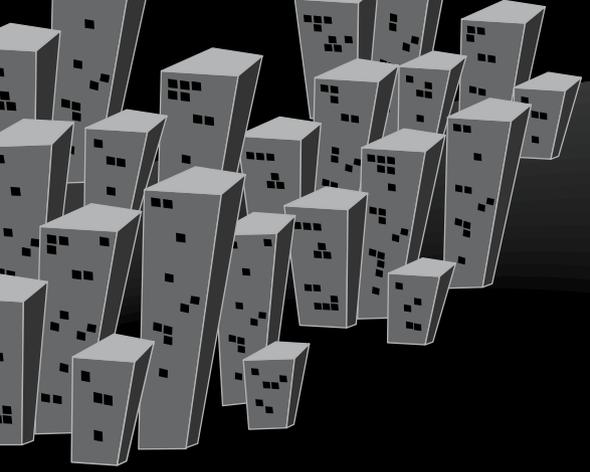
**Elektronen** können sich auf Satelliten ansammeln und zu elektrostatischen Entladungen führen, die wiederum die Elektronik beschädigen.

### SCHUTZMASSNAHMEN

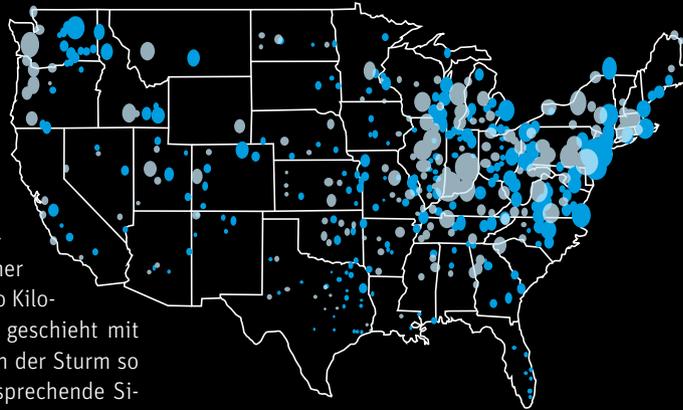
Noch widerstandsfähiger würden die Satelliten, wenn die Ingenieure deren Abschirmungen verstärkten, die elektrischen Spannungen der Solarmodule verringerten (um elektrostatischen Entladungen entgegenzuwirken), zusätzliche Back-up-Systeme einbauten und gegenüber Datenverlusten unempfindlichere Software entwickelten.







**Eine Studie zeigte**, dass ein dem Sonnensturm von 1921 vergleichbares Ereignis in großen Teilen der USA (graue und blaue Flächen) die Lichter ausgehen ließe. Im Erdboden würden sich dabei elektrische Felder einer Stärke von etwa 20 Volt pro Kilometer aufbauen. Und was geschieht mit der Stromversorgung, wenn der Sturm so stark wäre wie 1859? Entsprechende Simulationen stehen noch aus.



oder mehr verfälschen kann. Ein vergleichbarer Präzisionsverlust trat beim Sonnensturm vom 29. Oktober 2003 auf. Damals schaltete sich das Wide Area Augmentation System ab (ein Funknetz, das die Genauigkeit der GPS-Positionen verbessert), so dass viele Piloten auf Alternativen zurückgreifen mussten.

### Meidet die Polarregion!

Insbesondere in hohen Breiten würden energiereiche Teilchen auch den Funkverkehr mit Flugzeugen beeinträchtigen und entsprechende Gefahren heraufbeschwören. Flüge über die Polarregion wurden daher schon häufiger in niedrigere Breiten umgelenkt, außerdem mussten sie auf geringere Flughöhen gehen – Umwege, die jeweils Zehntausende von Dollar Treibstoffkosten verursachen können.

Selbst schwächere Stürme kommen uns teuer zu stehen. 2004 untersuchten Kevin Forbes von der Catholic University of America in Washington D.C. und Orville Chris St. Cyr vom Goddard Space Flight Center der NASA in Greenbelt, Maryland, eines der größten Stromnetze der USA. Ein Teil des Stroms daraus wird zu Real-Time-Preisen verkauft, die alle fünf Minuten ermittelt werden. In einem 19-monatigen Zeitraum in den Jahren 2000/2001, so fanden Forbes und St. Cyr heraus, hatten allein Sonnenstürme diese Preise um etwa drei bis vier Prozent erhöht.

Das US-Verteidigungsministerium wiederum schätzte ab, dass Störungen von Satelliten der amerikanischen Regierung durch solare Aktivitäten mit jährlich 100 Millionen Dollar zu Buche schlagen. Und von 1996 bis 2005 zahlten Versicherungen knapp zwei Milliarden Dollar für Schäden an kommerziellen Satelliten, die zum Teil ebenfalls auf ungünstiges Weltraumwetter zurückgehen.

Wie können wir uns schützen? Seit rund 20 Jahren bemühen sich Einrichtungen weltweit, Vorhersagemodelle für das Weltraumwetter zu entwickeln. Die Daten liefert allerdings ein Sammelsurium von Satelliten, die für ganz unterschiedliche Forschungsaufgaben entwickelt wurden, nicht aber für eine verlässliche, langfristige Beobachtung des Weltraumwetters. Um mehr Messwerte und damit zuverlässigere Vorhersagen zu gewinnen, bräuchten wir daher vor allem kostengünstige, langlebige Weltraumbojen, die mit einfachen Geräten »von der Stange« arbeiten. In jedem Fall aber haben die Forscher noch einen langen Weg vor sich, bis sie die Physik der Sonnenstürme verstehen und auch deren Folgen vorhersagen können. Wenn wir unsere technische Infrastruktur wirklich schützen wollen, müssen wir die Investitionen in ihre Vorhersage, Modellierung und Erforschung darum deutlich erhöhen – nur dann sind wir für den nächsten solaren Supersturm wirklich gerüstet. ◀



**Sten F. Odenwald** (links) ist Professor für Astronomie an der Catholic University of America in Washington D. C., außerdem Senior-Wissenschaftler bei SP Systems in Greenbelt (US-Bundesstaat Maryland). Das Unternehmen berät unter anderem die NASA in Fragen der Weltraumforschung und Informationstechnologie. Odenwald ist auch erfolgreicher Autor populärwissenschaftlicher Texte und steht als solcher beim Goddard Space Flight Center der NASA unter Vertrag. Seine wichtigsten Forschungsgebiete sind der kosmische Infrarot-hintergrund und die Phänomenologie des Weltraumwetters. **James L. Green** ist Direktor der Planetary Science Division der NASA, gehört zum Team der Magnetosphären-sonde IMAGE und ist auf die Magnetosphären von Planeten spezialisiert. Während seiner Arbeit an einer Veröffentlichung über den Einsatz von Ballons im amerikanischen Bürgerkrieg stieß er auf mehr als 200 Zeitungsartikel über den Sonnensturm von 1859.

---

**Forbes, K. F. et al.:** Solar Activity and Economic Fundamentals: Evidence from 12 Geographically Disparate Power Grids. In: Space Weather 6(10), S10003, 25. Oktober 2008.

**Forbes, K. F. et al.:** Space Weather and the Electricity Market. In: Space Weather 2(10), S10003, 21. Oktober 2004.

**Odenwald, S. F.:** The 23rd Cycle: Learning to Live with a Stormy Star. Columbia University Press, New York 2001.

**Shea, M. et al.:** The Great Historical Geomagnetic Storm of 1859: A Modern Look. In: Advances in Space Research 38(2), S. 117 – 118, 2006.

---

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter [www.spektrum.de/artikel/979749](http://www.spektrum.de/artikel/979749).