



# Sonnenwind und Weltraumwetter

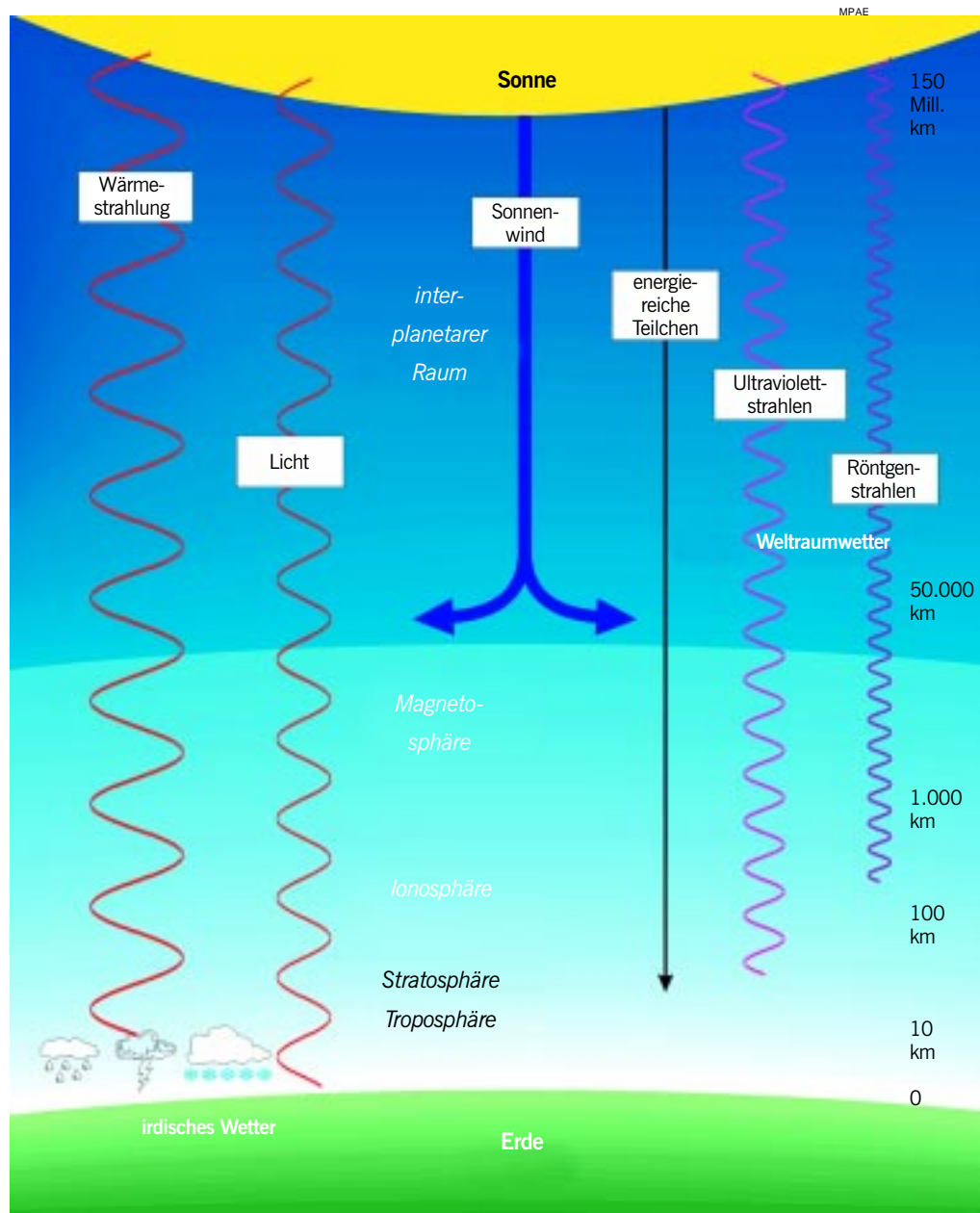
Eine neue Generation von Weltraumteleskopen zeigt uns unseren Heimatstern in ganz neuem Licht. Insbesondere die sprudelnde Dynamik der Sonnenatmosphäre fasziniert die Betrachter und setzt auch die Fachleute in Erstaunen. Zum ersten Mal können wir die ganze Kette von Vorgängen von der Sonnenoberfläche bis hin zur Erdatmosphäre lückenlos beobachten. Damit scheint eine verlässliche Vorhersage des Weltraumwetters in greifbare Nähe gerückt.

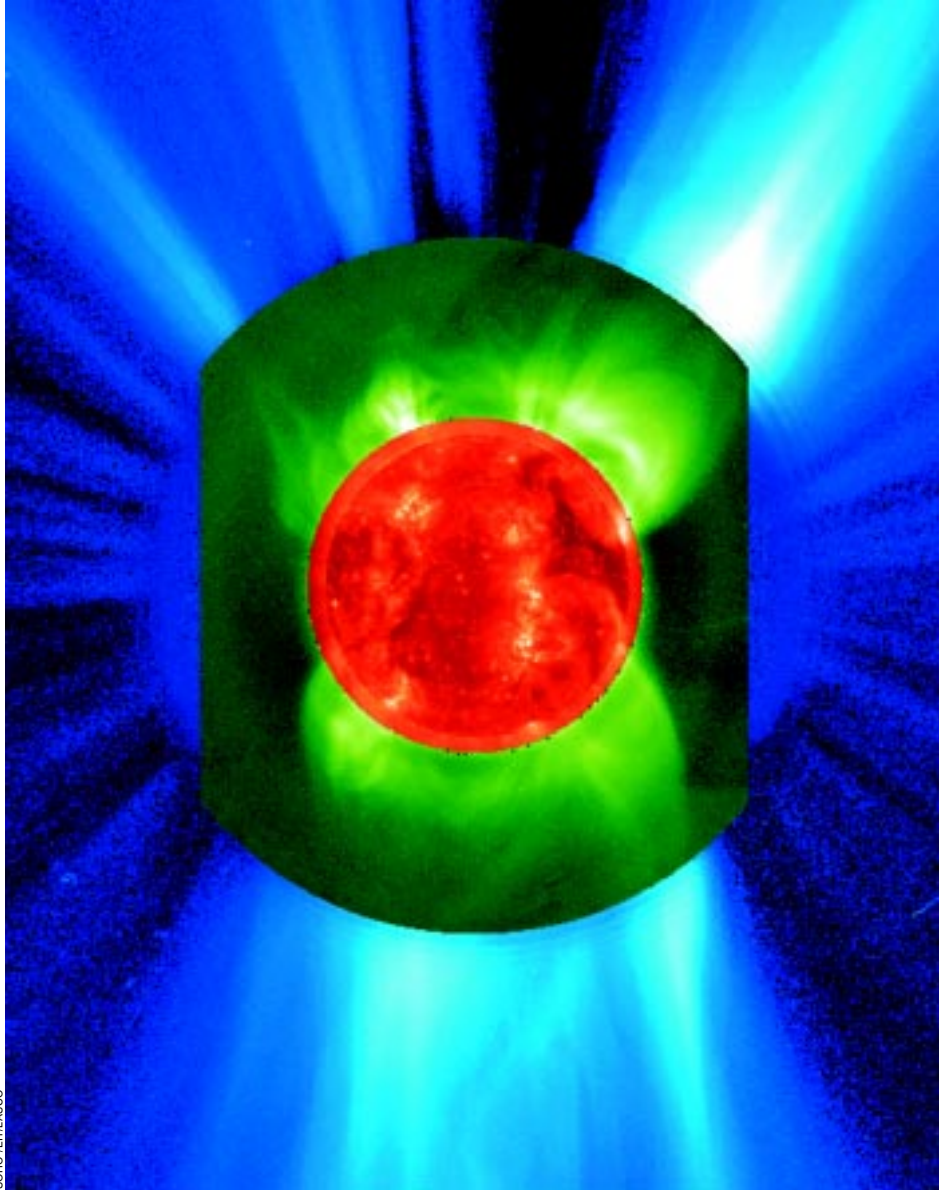
VON RAINER SCHWENN UND KRISTIAN SCHLEGEL

Intensive Polarlichter am Himmel, taumelnde oder sogar abstürzende Satelliten, Schäden an ihrer empfindlichen Elektronik, Störungen in Kommunikation und Navigation, Zusammenbrüche von Hochspannungsnetzen, Schäden an Öl-Pipelines, erhöhter Ausschuss bei der Chip-Produktion – all dies wird durch stürmisches Wetter im Weltraum ausgelöst. Gemeint ist der erdnahe Weltraum in rund 50000 Kilometer Umkreis um die Erde. Diesen Raum, der noch durch das Eigenmagnetfeld der Erde beherrscht wird, nennt man die Magnetosphäre. Sie stellt ein Hindernis für den anströmenden Sonnenwind dar, das heißt die ständig aus der Sonnenatmosphäre abdampfenden Gasmassen, und lenkt sie in großem Bogen um die Erde herum. Wir Erdenbürger merken davon normalerweise erst dann etwas, wenn es Sturm gibt.

Was sich hier ganz nach High-Tech im Satelliten-Zeitalter anhört ist im Prinzip schon lange bekannt. Es war am 1. September 1859, als der englische Astronom Richard Carrington beim Blick durch sein Teleskop zufällig Zeuge einer

**Unterschied zwischen irdischem und Weltraumwetter: Licht und Wärmestrahlung von der Sonne (links) durchqueren den erdnahen Weltraum unbeeinflusst und werden erst in der Troposphäre absorbiert, wodurch alle Erscheinungen unseres irdischen Wetters ausgelöst werden. Die in der Mitte und im rechten Bereich schematisch dargestellten Emissionen von der Sonne wirken in verschiedenen Bereichen des erdnahen Weltraums auf das Weltraumwetter ein.**





Die ausgedehnte Sonnenkorona wurde von drei Teleskopen auf SoHO aufgenommen. Rot: Die Sonnenscheibe im Licht der EUV-Linie bei 19,5 Nanometer, aufgenommen mit dem EUV-Imaging Telescope (EIT). Grün: Die innere Korona im Licht der grünen Koronalinie bei 530,3 Nanometer, aufgenommen mit dem neuartigen Spiegelkoronographen LASCO-C1, der am Max-Planck-Institut für Aeronomie in Katlenburg-Lindau entwickelt wurde. Blau: die äußere Korona, aufgenommen in weißem Licht mit dem Koronographen LASCO-C2.

riesigen Explosion auf der Sonne wurde. Dieses erste beobachtete Flare, ein sehr heller, kurzer Lichtblitz auf der Sonne, zählt übrigens zu den zehn stärksten, die jemals beobachtet wurden! Als damals dann knapp 20 Stunden später ein gewaltiger magnetischer Sturm auf der Erde einsetzte und weltweit die Kompassnadeln zittern ließ, war der Zusammenhang offensichtlich. So nahm das Studium der Sonne-Erde-Beziehungen und damit des Weltraumwetters seinen Anfang.

Inzwischen haben wir gelernt, dass die Sonne auf vielfältige Weise Einfluss auf das Weltraumwetter ausübt. Neben der sichtbaren und der infraroten Strahlung, die das Leben auf der Erde ermöglichen und unser irdisches Wetter antreiben, gehen auch andere Strahlungsformen und Teilchenströme von unserem Hausstern aus. Das Strahlungsspektrum reicht von den Radiowellen über das sichtbare Licht bis zum Ultraviolett- und Röntgenbereich. Der Hauptanteil der alles Leben schädigenden Ultraviolettstrahlung wird zum Glück in der Ozon-

schicht, die etwa in 30 Kilometer Höhe in der Stratosphäre liegt, absorbiert, Röntgenstrahlung gar schon in der Ionosphäre unterhalb von 100 Kilometer Höhe. Auch die Teilchen des ständig wehenden Sonnenwindes sind hier zu nennen. Er drückt kräftig auf die Vorderseite der Magnetosphäre und knetet sie regelrecht durch. Wir können das an den Schwankungen des geomagnetischen Feldes erkennen, die schon Carl Friedrich Gauß vor 180 Jahren beschrieben und studiert hat. Schließlich noch die energiereichen Teilchen (mit Energien über 1 Megaelektronvolt) der nur gelegentlich auftretenden solaren Kosmischen Strahlung. Sie bleiben überwiegend in der Mesosphäre und Stratosphäre stecken und verändern dabei die Luftelektrizität.

### Korona und Sonnenwind

Die Intensität des alles überstrahlenden sichtbaren Lichts variiert nur um rund 0,1 Prozent im 11-Jahresrhythmus der Sonnenaktivität. Das ist überraschend

wenig; denn die anderen genannten Einflüsse schwanken prozentual deutlich stärker und werden dadurch für uns als direkte Einwirkungen der Sonne überhaupt erst erkennbar.

Die obere Sonnenatmosphäre, die Korona, ist so heiß (1 bis 2 Millionen Kelvin), dass selbst die ungeheure Schwerkraft der Sonne nicht ausreicht, sie zusammenzuhalten. So entweicht ständig ein Strom aus hochionisiertem Gas, das die gesamte Heliosphäre erfüllt. Dieses Gas wird ganz treffend Sonnenwind genannt. Es hat, wie wir es bei der Erdbahn antreffen, normalerweise etwa die folgenden Eigenschaften: eine Strömungsgeschwindigkeit von 300 bis 800 Kilometer pro Sekunde, eine Teilchendichte von 3 bis 10 Teilchen pro Kubikzentimeter. Es besteht aus 95 Prozent Protonen, 4 Prozent Heliumionen, geringen Anteilen schwerer Ionen und entsprechend vielen Elektronen. Die Temperatur der Protonen beträgt 40000 Kelvin, die der Elektronen 150000 Kelvin. Die Magnetfeldstärke ist 4 Nanotesla.

Die Eigenschaften des Sonnenwindes sind im Wesentlichen durch seine jeweilige Quelle in der Korona geprägt und können sehr unterschiedlich sein. Wie stark die Sonnenatmosphäre in der Tat strukturiert ist, weiß man von Sonnenfinsternisbeobachtungen schon lange. Inzwischen erlauben moderne Weltraumteleskope wie die auf SoHO, dem Solar and Heliospheric Observatory von ESA und NASA, die ausgedehnte Sonnenatmosphäre ständig im Blick zu halten. Die Strukturen aus der unteren Korona setzen sich bis weit nach draußen fort. Alles wird vom Magnetfeld der Sonne beherrscht, von den kleinskaligen Bögen über aktiven Gebieten und Sonnenflecken bis zu den großräumigen „helmet streamers“, die an Pickelhauben erinnern. Das ganze Muster rotiert mit der Sonne und verändert sich dabei ständig. Deshalb schwanken auch die Sonnenwindströme, die schließlich die Erde bezie-

ungsweise ihre Magnetosphäre treffen, in ihren Eigenschaften sehr stark. Der Sonnenwind überträgt Druckschwankungen auf die Magnetosphäre und lässt sie buchstäblich wie eine Wetterfahne weit in den interplanetaren Raum hinaus flattern. Veränderungen des Weltraumwetters gehen also vor allem auf Strukturen und Variabilität der Korona zurück, die durch das Medium Sonnenwind übertragen werden.

### Explosionen auf der Sonne: Flares und Massenauswürfe

Besonders dramatisch sind die Veränderungen im Sonnenwind, die im Gefolge von großen Eruptionen auf der Sonne auftreten. Explosionsartig werden dabei gewaltige Energiemengen freigesetzt und riesige Gasblasen in den Weltraum ausgestoßen. Sie treiben Stoßwellen an, die in den interplanetaren Raum rasen und in manchen Fällen buchstäblich das gesamte Sonnensystem erschüttern. Bei aller Dramatik ist es doch wichtig, die Unterschiede zwischen verschiedenen Ereignistypen zu beachten; denn darauf beruhen auch ihre ganz unterschiedlichen Bedeutungen für die Erde.

Zunächst zu den seit Carrington bekannten Flares. Sie machen sich optisch durch einen nur Minuten andauernden hellen Lichtblitz in einem eng begrenzten Gebiet auf der Sonne bemerkbar. Gleichzeitig werden auch die Intensitäten der Röntgenstrahlen und der energiereichen Protonen und Elektronen (bis etwa 100 Megaelektronvolt) oft um mehr als das Tausendfache erhöht, Prozesse in Atomkernen am Flare-Ort können sogar Gamma-Strahlung freisetzen. Es dauert oft viele Stunden, bis die Röntgenstrahlung wieder abgeklungen ist. Flares treten in sehr unterschiedlichen Stärken auf, daher sind die Intensitäten dieser Strahlung auch sehr variabel. Besonders starke Ereignisse häufen sich auffällig in den Jahren kurz vor und nach einem Aktivitätsmaximum. Dann werden an manchen Tagen bis zu zehn Röntgenflares beobachtet.

Die verschiedenen Strahlungsformen erreichen die Erde natürlich mit Lichtgeschwindigkeit. Aber auch die extrem energiereichen Teilchen stehen dem nicht viel nach. Sie werden durch das interplanetare Magnetfeld zu teils erheb-

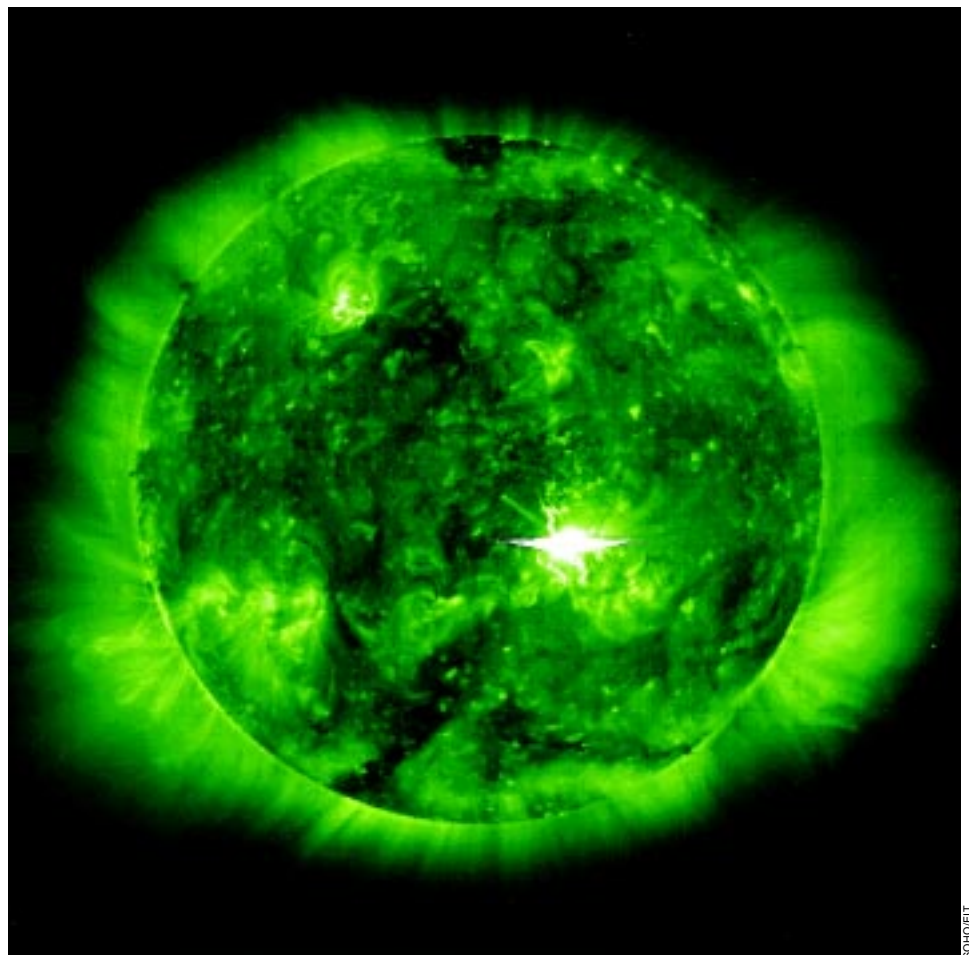
lichen Umwegen gezwungen und kommen an der Erde erst 10 bis 30 Minuten später an. Dort können sie beachtlich dicke Satellitenwände durchschlagen, Fernsehkameras zeitweilig zum Szintillieren bringen und elektronische Bauelemente auf Satelliten beschädigen. Diese Strahlung stellt auch für Astronauten eine durchaus ernst zu nehmende Gefahr dar. Ansonsten dringen die Teilchen tief in die Erdatmosphäre ein, vor allem über den Polargebieten, bis sie in etwa 40 bis 60 Kilometer Höhe durch Stöße mit den Atmosphärenteilchen schließlich abgebremst sind.

Auch die Röntgenstrahlung von Flares wird in den untersten Schichten der Ionosphäre in etwa 60 bis 90 Kilometer Höhe absorbiert. Das hat dort eine Erhöhung des Ionisationsgrades zur Folge, der normalerweise sehr gering ist. Dadurch steigt die Absorption von Radiowellen erheblich an, was unter anderem den Kurzwellenfunk stark behindert. Übrigens gehen von Flares auch starke breitbandige Radiosignale aus (radio bursts), die den Signalempfang auf der Erde empfindlich stören können.

Von Flares sorgfältig zu unterscheiden sind Massenauswürfe aus der Korona (coronal mass ejections, CMEs). Da-

bei werden riesige Gaswolken von einigen 10 Billionen Kilogramm mit großen Geschwindigkeiten ausgestoßen. Man kann sie nur mit einem Koronographen sichtbar machen, vorzugsweise vom Weltraum aus. Dabei muss – ähnlich wie bei einer Sonnenfinsternis – die helle Sonnenscheibe künstlich abgedeckt werden, so dass die millionenfach schwächere Korona sichtbar wird.

Deshalb hat die Entdeckung von CMEs bis 1971 gedauert, und es vergingen noch weitere Jahre, bis ihre Bedeutung gerade für das Weltraumwetter erkannt wurde. CMEs entstehen vielfach aus großskaligen Protuberanzen. Das sind lange Schläuche aus relativ kaltem Gas, die in die heiße Korona eingebettet sind. Man kann sie im roten Licht der H-alpha-Linie über dem Sonnenrand leicht sehen, auch auf der Sonnenscheibe als Filamente, dann aber in Absorption, also dunkel gegen hellen Hintergrund. Sie werden von magnetischen Arkaden gehalten beziehungsweise getragen und harren oft monatelang stabil aus. Gänzlich unvermutet und sehr abrupt können sie sich auf einmal von der Sonne lösen und wie losgelassene Ballons mit großer Geschwindigkeit davonfliegen. Gerade bei den größten Ereignissen tritt oft an ▶



Das Röntgenflare wurde am 2. Mai 1998 von EIT auf SoHO beobachtet. Der helle Lichtblitz führte zu stellenweiser Überbelichtung des CCD-Detektors, daher die seitlichen „Nadeln“.



**Beispiel für einen koronalen Massenauswurf (CME), den LASCO C2 und C3 sowie EIT am 15. Mai 2000 aufgenommen haben. Hier wird nicht nur heißes Gas aus der Korona (die weißliche äußere Blase) ausgeschleudert, sondern auch „kaltes“ Gas aus der Chromosphäre (die fadenartigen Strukturen im Inneren). In dieser Zeit wanderten die vier Planeten Jupiter, Saturn, Merkur und Venus hinter der Sonne vorbei durch das Blickfeld des Koronographen. Links oben das Sternbild der Plejaden.**

einem der magnetischen Fußpunkte auch ein Flare auf, in vielen Fällen jedoch erst nach der Ablösung.

Wenn solche magnetisierten Gasblasen durch das Sonnenwindplasma pflügen, verbiegen sie dabei stark das interplanetare Magnetfeld (IMF). Im Normalfall ist die Richtung des IMF etwa radial (abgesehen von der generellen Spiralform, die durch die Sonnenrotation entsteht) und liegt insbesondere in der Erdbahnebene. Durch CMEs kann das IMF weit aus ihr herausgedreht werden. Wenn dabei eine nach Süden gerichtete Feldkomponente entsteht, kommt es an der Frontseite der Magnetosphäre zu einem magnetischen Kurzschluss mit den dort nordwärts gerichteten Feldlinien des irdischen Magnetfeldes. Es entsteht eine direkte Verbindung von interplanetaren mit irdischen Magnetfeldlinien, längs derer nun geladene Teilchen von außen in die Magnetosphäre eindringen können. Mit anderen Worten: Der magnetische Schutzschild der Erde ist durchlöchert. Massive Störungen des Weltraumwetters können die Folge sein.

Für beide Phänomene, Flares wie CMEs, sind die Ursachen ihrer Entste-

hung weitgehend ungeklärt, und wir kennen noch keine verlässlichen Hinweise, die bevorstehende Eruptionen und deren Stärke vorherzusagen erlaubten. Bei den sehr großen Ereignissen treten CMEs und Flares immer in engem zeitlichen Zusammenhang auf, so dass Ursachen und Wirkungen nur schwer zu unterscheiden sind. Daneben gibt es aber durchaus CMEs ohne assoziierte Flares sowie auch viele Flares ohne CMEs. Wir denken heute, dass beide Phänomene Produkte einer gemeinsamen tiefer liegenden Ursache sind, sozusagen Symptome einer noch verborgenen magnetischen Krankheit, die dann auf ganz verschiedene Art und unvermutet zum Ausbruch kommt.

### Unzuverlässige Wettervorhersage

Der seit Carrington etablierte Zusammenhang von Flares mit geomagnetischen Effekten musste inzwischen revidiert werden. Denn was den Erdmagnetismus erzittern lässt, sind primär die CMEs beziehungsweise die von ihnen verursachten Stoßwellen und Magnetfeldverbiegungen und keineswegs die

Flares. Die Weltraumwettervorhersage aufgrund von Flares war übrigens nie sehr zuverlässig. Wären CMEs mit Teleskopen vom Erdboden aus zu sehen und nicht nur mit Koronographen von Satelliten aus, wäre wahrscheinlich manche Verwirrung vermieden worden! Wenn auch Flares für Störungen des Geomagnetismus nun nicht länger zuständig sind, so behalten sie doch durch ihre Strahlungseinwirkungen auf die Erde erhebliche Bedeutung.

Zu erwähnen sind hier noch die extrem energiereichen Teilchen der galaktischen kosmischen Strahlung (mit Energien oberhalb von 1 Gigaelektronvolt). Deren Auswirkungen reichen bis auf die Erdoberfläche herab. Insbesondere tragen sie zur Ionisierung von Atomen in der Stratosphäre in 10 bis 20 Kilometer Höhe bei und damit zu Entstehung von Kondensationskeimen für die Wolkenbildung, wodurch auch das irdische Wetter/Klima beeinflusst wird. Die ohnehin geringen Intensitäten dieser Strahlung nehmen zum Aktivitätsmaximum hin noch deutlich ab. Sie werden nämlich durch die verstärkten Turbulenzen im gesamten heliosphärischen Plasma besser abgeschirmt als zu Zeiten der inaktiven Sonne. Diese Turbulenzen entstehen durch die Vielzahl von interplanetaren Stoßwellen von der aktiven Sonne. Sie laufen großräumig schalenförmig nach außen, vereinigen sich miteinander und bilden so eine Art Schutzschirm für das innere

Sonnensystem. Die Intensitäten der galaktischen kosmischen Strahlung schwanken also antizyklisch zur Sonnenaktivität, ganz im Gegensatz zu den solaren energiereichen Teilchen. Das ist für die Erde insofern von Bedeutung, als über diesen Mechanismus die Modulation der Sonnenaktivität direkt in das Klimageschehen auf der Erde einkoppelt.

Die Magnetosphäre, also der Bereich des erdnahen Weltraums, der vom Erdmagnetfeld dominiert wird, bildet für den Sonnenwind ein Hindernis, das er formt und umströmt. Ohne Sonnenwind wäre die Magnetosphäre ein symmetrisches Gebilde, wie wir es von den Magnetfeldlinien eines Stabmagneten kennen. Der Sonnenwind presst die Magnetfeldlinien vorn zusammen und zieht sie hinter der Erde zu einem langen Schweif aus.

Die Grenzfläche der Magnetosphäre nach außen ist die Magnetopause. Sie trennt das Plasma des Sonnenwindes von dem der Magnetosphäre. Sie bildet sich dort aus, wo der dynamische Druck des Sonnenwindes gleich dem Druck des Erdmagnetfeldes wird. Deshalb ist ihre Form sehr variabel. Bei normalem Sonnenwind liegt die Magnetopause bei etwa 10 Erdradien Abstand. Die Gasblasen im Gefolge von CMEs können jedoch die Magnetosphäre ganz erheblich komprimieren. So wurde zum Beispiel die Magnetosphäre am 10. Januar 1997 bis auf 5 Erdradien zusammengestaucht!

Durch das Vorbeiströmen des Sonnenwindes an der Magnetosphäre wird durch einen Dynamoeffekt ein kompliziertes System von Strömen im Inneren der Magnetosphäre angetrieben. Das fließende Sonnenwindplasma ist dabei der Rotor dieses Dynamos, das Erdmagnetfeld der Stator. Die Vorgänge dabei sind sehr kompliziert und auch heute noch nicht bis ins Einzelne verstanden. Eine wichtige Rolle spielt stets die Verschmelzung von Feldlinien des Erdmagnetfeldes mit denen des IMF; denn da-

**Die Magnetosphäre der Erde im Längsschnitt: Der vorbeiströmende Sonnenwind treibt komplizierte Stromsysteme im Inneren der Magnetosphäre an (zum Beispiel polarer Elektrojet und Ringstrom). Dabei werden unter anderem Elektronen aus der Plasmaschicht entlang der Feldlinien zur Erde hin in polnahe Gebiete geleitet (kleine rote Pfeile), wo sie das Polarlicht auslösen. Die Magnetosphäre wird durch den anströmenden Sonnenwind geformt und ständig durchgeschüttelt, ihr Schweif (rechts) flattert dabei wie eine Fahne im Wind weit in den Raum hinaus.**

bei wird ein Bruchteil der Energie des strömenden Sonnenwindes in die Magnetosphäre übertragen. Wenn das IMF eine starke Südwärtskomponente hat, funktioniert die Feldlinienverschmelzung besonders gut, und es kommt zu dem schon erwähnten magnetischen Kurzschluss.

### Einwirkungen aus der Magnetosphäre auf die Ionosphäre

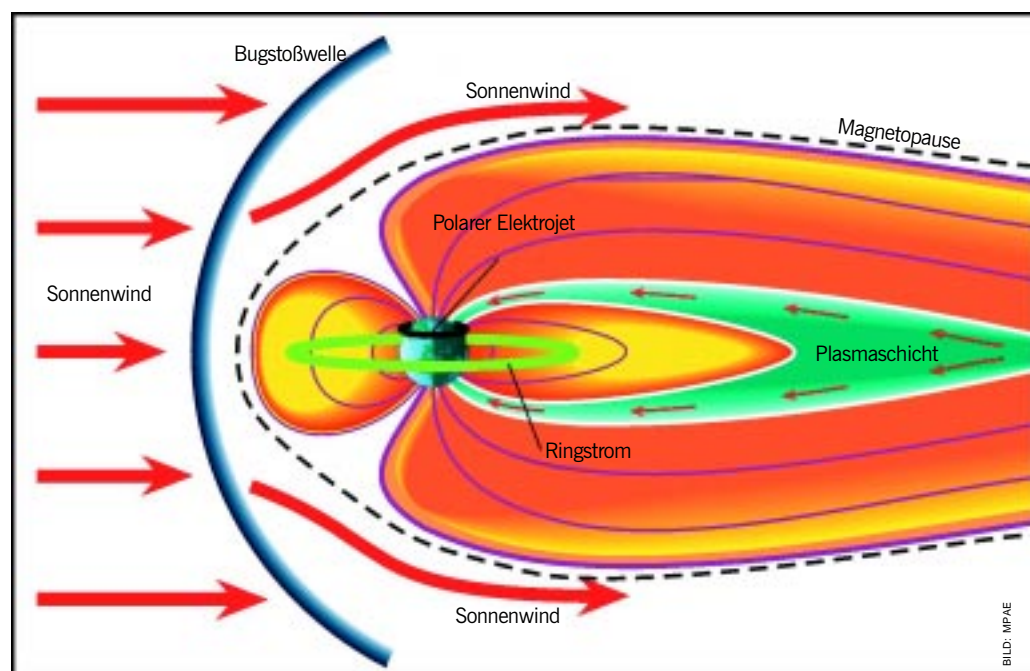
Eines der vom Sonnenwind angetriebenen Stromsysteme ist der äquatoriale Ringstrom. Er fließt in der Äquatorebene von Osten nach Westen in einem geozentrischen Abstand von 4 bis 6 Erdradien und wird hauptsächlich von Protonen getragen. Das Eigenmagnetfeld dieses Ringstroms ist dem konstanten Erdmagnetfeld entgegengerichtet. Während gestörter Bedingungen wird dieser Strom durch den Zufluss von Teilchen aus dem Magnetosphärenschweif erheblich verstärkt, die Teilchenflüsse können um mehr als das Hundertfache zunehmen. Dementsprechend beobachtet man in niedrigen Breiten während gestörter Bedingungen eine deutliche Reduktion des Gesamtfeldes am Boden. Diese Reduktion stellt als so genannter  $D_{ST}$ -Index einen wichtigen Parameter zur Kennzeichnung der Stärke eines magnetischen Sturmes dar.

Von besonderer Wichtigkeit sind die Stromsysteme in den Polgegenden der Erde, denn dort tauchen die Dipolfeldlinien des Erdmagneten steil in die Atmosphäre ein. Auch diese Ströme werden

durch den Sonnenwind in der Magnetosphäre angetrieben, aber in der Nähe der Pole reichen sie bis in die Ionosphäre in eine Höhe von etwa 100 bis 150 Kilometer herunter. Diese so genannten Birkeland-Ströme werden im Wesentlichen durch Elektronen getragen, die um Magnetfeldlinien spiralen. In der Ionosphäre schließt sich der Stromkreis in Form des in Nord-Süd-Richtung fließenden Pedersenstromes, der seinerseits einen Hallstrom in Ost-West-Richtung antreibt. Dieser Strom wird als polarer Elektrojet bezeichnet. In vertikaler Richtung beträgt die Dicke dieser Stromschicht etwa 30 Kilometer, in horizontaler Richtung einige 100. Der Gesamtstrom kann bei stark gestörten Bedingungen durchaus auf eine Million Ampere anwachsen!

Hall- und Pedersenstrom erzeugen ihrerseits ein Magnetfeld, das dem konstanten Erdmagnetfeld überlagert ist und am Boden gemessen werden kann. Das geschieht in einer Reihe von automatisierten Messstationen, deren Daten zu weiteren nützlichen Indizes für die geomagnetische Aktivität zusammengefasst werden, etwa die Planetarische Kennziffer  $K_p$ . Bei starken Störungen können die Magnetfelder so sehr schwanken, dass sie magnetische Kompasser außer Funktion setzen. Deshalb prägte Alexander von Humboldt den Begriff magnetisches Ungewitter für diese Vorgänge.

Die Energie der Elektronen, welche die Birkeland-Ströme tragen, reicht von einigen Elektronvolt bis zu über 10 Kilo-elektronvolt. Die energiereicheren Elek-



tronen stoßen in 100 bis 300 Kilometer Höhe auf neutrale Teilchen und regen sie zum Leuchten an. Auf diese Weise entsteht das Polarlicht (lateinisch und heute auch englisch Aurora) – der einzige deutlich sichtbare Indikator für das Weltraumwetter. Es ist im Normalfall auf die ringförmigen Polarlichttovale bei sehr hohen Breiten beschränkt und damit von bewohnten Gebieten aus nicht zu sehen. Bei starken magnetischen Stürmen steigt die Intensität besonders der Kiloelektronvolt-Elektronen an. Damit wird das Polarlicht nicht nur sehr viel heller, sondern das Oval dehnt sich weit in Richtung Äquator aus und wird manchmal sogar bei uns sichtbar. Bereits im Jahre 1716 hatte der englische Astronom Edmund Halley nach einem spektakulären Nordlicht mit gleichzeitigen magnetischen Störungen ganz richtig einen Zusammenhang zwischen beiden Phänomenen vermutet.

Polarlichter (auch Nord- oder Südlichter genannt) haben die Menschen von jeher fasziniert, und in den Sagen und Mythen besonders der Nordlandbewohner spielten sie immer eine große Rolle. In früheren Zeiten fürchteten sich die Beobachter vor dem ungewohnten, unheimlichen Zeichen am Himmel, besonders weil es in unseren Breiten meistens

tiefrot erscheint, also an Blut erinnert. Man betrachtete es daher als schlimmes Vorzeichen für Unheil und Krieg.

Die energiereichen Elektronen haben noch einen weiteren Effekt. Zusätzlich zur solaren UV-Strahlung ionisieren sie das Neutralgas und verursachen auf diese Weise eine starke Erhöhung der Plasmadichte. Dadurch vergrößert sich die ionosphärische Leitfähigkeit, wodurch wiederum die Stromdichte noch weiter ansteigt. Zusätzlich verändern sich die Absorptions- und Reflexionseigenschaften der Ionosphäre für elektromagnetische Wellen – mit Konsequenzen für Kommunikation und Navigation.

### Einwirkungen aus der Ionosphäre auf die Thermosphäre

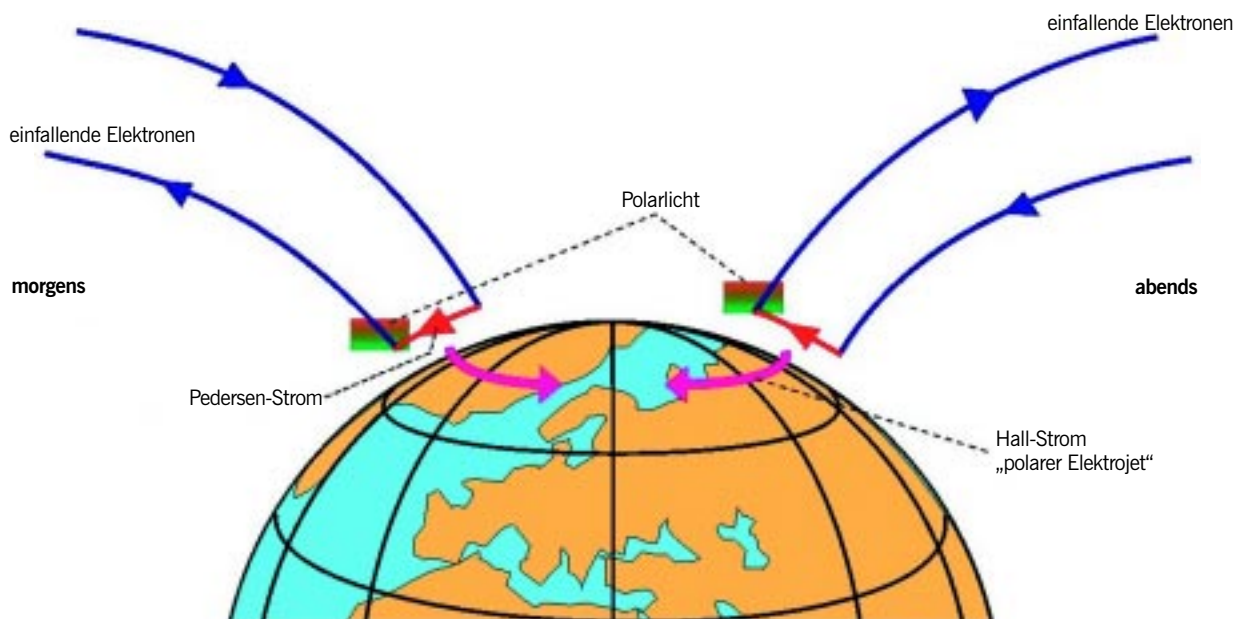
Wo Ströme durch einen schlechten Leiter fließen, erzeugen sie Wärme. So ist es auch im Plasma der Ionosphäre. Insbesondere die Pedersenströme heizen es auf, wie in einem elektrischen Heizofen. Es gibt die Wärme an das Neutralgas der Atmosphäre ab, wodurch auch diese heiß wird. Obwohl die Wärmequelle zwischen 100 und 200 Kilometer hoch liegt, wird letztlich die gesamte Thermosphäre (zwischen etwa 90 und 1000 Kilometer Höhe) beeinflusst. Dadurch dehnt sie sich auch

aus. Wegen der Lage des polaren Elektrojets wird diese Wärme zunächst in hohen geografischen Breiten zugeführt, gelangt dann aber durch dynamische Prozesse (Winde und atmosphärische Wellen) auch zu niedrigeren Breiten.

Auch die chemische Zusammensetzung in der Thermosphäre wird während eines Magnetsturms aufgrund einer veränderten Ionenchemie beeinflusst: Die Dichten von  $N_2$  und  $O_2$  werden gegenüber dem dominierenden atomaren Sauerstoff erhöht.

Während ruhiges Weltraumwetter für uns kaum wahrnehmbar ist, können Störungen erhebliche Probleme verursachen, besonders für technische Systeme. Die Stärke des polaren Elektrojets variiert während eines Magnetsturms in unregelmäßiger Weise, auf Zeitskalen von einigen 10 Sekunden bis zu mehreren Minuten. Damit wirkt er wie der Primärstrom in einem riesigen Transformator. Dessen Sekundärspulen können zum Beispiel lange Überlandleitungen sein, wobei der Stromkreis sich über den Erdboden schließt. Dadurch verschieben sich die Arbeitspunkte der Hochspannungstransformatoren in ungünstiger Weise, so dass diese warm laufen und sogar zerstört werden können. Auch werden Spannungsspitzen induziert, welche die Netz-

## Birkeland-Ströme und Ströme in der Ionosphäre



System der Birkeland-Ströme in und aus der Ionosphäre: Die Ströme werden durch Elektronen getragen, die sich auf Spiralbahnen längs der Magnetfeldlinien bewegen. Der Stromkreis der Birkeland-Ströme wird in der Ionosphäre durch die Pedersenströme geschlossen. Der Hallstrom kommt durch die Pedersenströme und das senkrecht dazu stehende Erdmagnetfeld zustande. Die einfallenden Elektronen, die eine Energie größer als etwa 1 Kiloelektronvolt aufweisen, erzeugen Polarlicht. Ähnliche Vorgänge spielen sich immer auch in der Nähe des Südpols ab.



THOMAS ULICH

Ein grünes Polarlicht erfüllt den ganzen Himmel über Nordfinnland. Die grüne Farbe, die für das Polarlicht hoher geografischer Breiten charakteristisch ist, kommt zustande, wenn Sauerstoffatome von den in die Atmosphäre einfallenden Elektronen getroffen werden.

MARK VORNHUSEN

Zum letzten Mal wurde über Deutschland am 31. März 2001 Polarlicht beobachtet, wie dieses Bild aus Niederbayern zeigt. In mittleren geografischen Breiten ist die vorherrschende Farbe des Polarlichts rot und violett.

regulierung durcheinanderbringen und zu Sicherheitsabschaltungen führen. Bei einem schweren Magnetsturm im März 1989 fiel auf diese Weise das Stromnetz der gesamten Provinz Quebec in Kanada aus, sechs Millionen Einwohner waren neun Stunden lang ohne elektrische Energie. Schädliche Ströme werden in nördlichen Breiten auch in langen Öl-Pipelines induziert. Wenn sich über das Erdreich ein Stromkreis schließt, kann es an den Übergangsstellen Erde-Metallrohr zu erheblichen Korrosionsschäden kommen. Sehr viel indirekter sind andere Auswirkungen: So wurde beispielsweise festgestellt, dass während Magnetstürmen die Ausfallraten bei der Herstellung von Halbleiterbauelementen (etwa Chips) messbar ansteigen.

Die Teilchen, die aus der Magnetosphäre in die Ionosphäre eindringen, erhöhen lokal die Elektronendichte, besonders in hohen geografischen Breiten. Das stört die Funkwellenausbreitung und auch die Kommunikation mit Satelliten. Gleichzeitig verändern die erhöhten Elektronendichten der Ionosphäre die Laufzeiten der Wellen, auf denen die meisten Navigationssysteme basieren (etwa GPS). Das kann schwerwiegende Folgen haben.

Besonders gefährdet sind künstliche Satelliten durch Störungen im Weltraumwetter. Die Aufheizung der Thermosphäre bewirkt eine Erhöhung der Luftdichte in Satellitenhöhe um bis zu 100 Prozent. Satelliten werden dadurch auf ihrer Bahn plötzlich stärker ge-



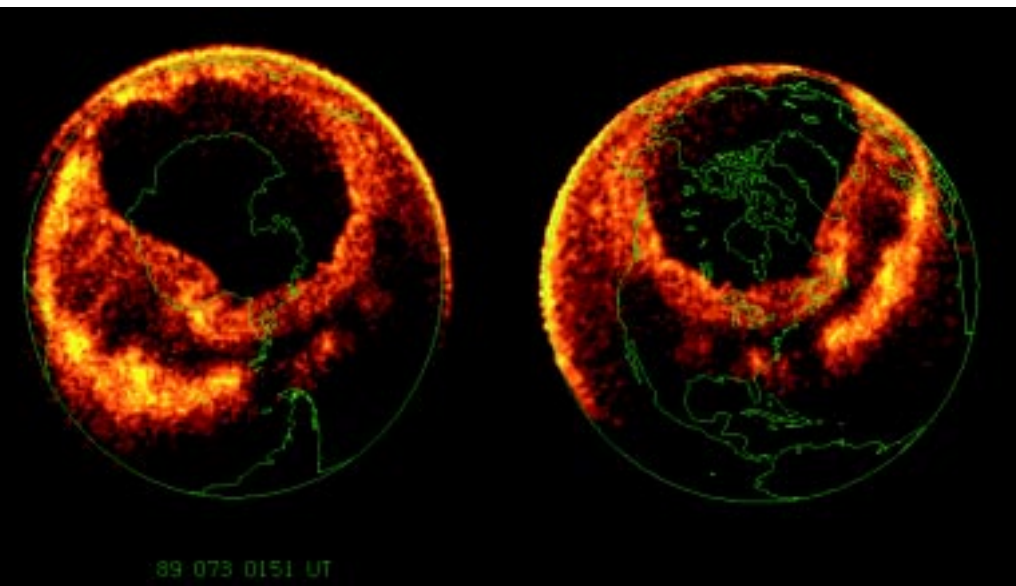
bremst, können ihre Orientierung verlieren oder sogar abstürzen. Dies betrifft vor allem Satelliten in Höhen unter 800 Kilometer.

### Gefahren für Mensch und Technik

Eine andere Gefahr droht Satelliten in geostationären Umlaufbahnen. Hier werden die Flüsse der Ringstromteilchen während Magnetstürmen oft um mehrere Größenordnungen erhöht. Dadurch können sich isolierte Teile der Oberfläche eines Satelliten elektrisch stark aufladen, und Hochspannungsüberschläge sind die Folge. Sie verursachen Defekte oder lassen bestimmte Funktionen des Satelliten total ausfallen. Auch die hochenergetischen Teilchen von solaren Flares können empfindliche Halbleiterbauelemente schädigen. Wissenschaftler haben abge-

schätzt, dass allein bei Satelliten der amerikanischen Regierung jährlich etwa 150 Ausfälle aufgrund dieser beiden Schadensquellen auftreten. Die schwankenden Magnetfelder können überdies die Orientierung von magnetisch stabilisierten Satelliten stören. Wenn man bedenkt, wie stark unsere Zivilisation inzwischen von Satelliten abhängt (Telefon, Fernsehen, Datenübertragung, Navigation, Wettervorhersage), kann man sich ausmalen, dass Ausfälle hier erhebliche volkswirtschaftliche Schäden anrichten.

Nicht zu vernachlässigen sind Einflüsse des gestörten Weltraumwetters auf biologische Systeme. Besonders gefährdet sind Astronauten, die wegen der Gewichtsbeschränkung in Raumfahrzeugen kaum wirksam gegen durchdringenden Strahlung abgeschirmt werden können. Die Strahlendosen von starken Flares ►



L. A. FRANK, UNIVERSITY OF IOWA (<http://www-pl.physics.uiowa.edu/sai/gallery>)

Ausgedehntes Polarlichtoval, fotografiert von dem Forschungssatelliten Dynamics Explorer aus etwa 40 000 Kilometer Höhe während des stärksten geomagnetischen Sturms des letzten Jahrhunderts, am 13./14. März 1989. Tatsächlich aufgenommen wurde nur das linke Teilbild über der Südhalbkugel. Da Polarlicht stets gleichzeitig über der Nord- und der Südhalbkugel erscheint, wurden die leuchtenden Bereiche mit Hilfe des sehr genau bekannten geomagnetischen Feldes rechnerisch auch auf die Nordhalbkugel projiziert. Das hellleuchtende Lichtband erstreckt sich quer über Mitteleuropa (rechtes Teilbild).

sind in der Tat lebensbedrohend. Am größten ist die Gefahr für Astronauten, die außerhalb des Raumfahrzeugs arbeiten oder lange unterwegs sind (etwa bei einem Flug zum Mars). Für das starke Sonnenflare vom Oktober 1989 hat man errechnet, dass der Strahlenfluss für einen nur mit einem Raumanzug bekleideten Astronauten auf dem Mond absolut tödlich gewesen wäre. Auch in extrem hochfliegenden Flugzeugen, vor allem auf den Polarrouten, sind Piloten und Passagiere erhöhten Strahlendosen ausgesetzt. Die Auswirkungen besonders energiereicher Teilchen können gelegentlich sogar den Erdboden erreichen. Offenbar hat sich aber das Leben auf der Erde im Laufe der Evolution an derartige Teilchenschauer gewöhnt.

Aus umfangreichen statistischen Untersuchungen in Russland geht hervor, dass empfindliche Menschen oder Kranke solche subtilen Einwirkungen der Sonne (auch die Auswirkungen von Ma-

gnetstürmen) verstärkt spüren oder darauf reagieren. Seit längerer Zeit ist auch bekannt, dass Briertauben und Zugvögel bei Magnetstürmen manchmal ihr Ziel verfehlen. In diesem Grenzgebiet zwischen Physik, Biologie und Medizin ist noch viel Forschungsarbeit zu leisten. Vielleicht wird es dann irgendwann zu Magnetsturmwarnungen kommen, so wie schon jetzt Ozonalarm aufgrund bestimmter Wetterlagen gegeben wird.

### Einflüsse durch kosmische Katastrophen

Bisher haben wir nur die Sonne als verantwortlich für das Weltraumwetter betrachtet. Aber auch Einflüsse von außerhalb unseres Sonnensystems, ja sogar von außerhalb unserer Milchstraße sind nicht außer Acht zu lassen. Die Zahl von extrem energiereichen Teilchen und Quanten der kosmischen Strahlung, meist extragalaktischen Ursprungs, die in das Sonnensystem eindringen und auch die Erde erreichen, scheint in den letzten Jahrtausenden ziemlich konstant gewesen zu sein, abgesehen von der schon erwähnten Modulation im Sonnenzyklus. Eine starke Erhöhung dieser Teilchenflüsse würde zum Beispiel als Folge einer Supernova-Explosion in unserer „Nähe“ eintreten. Bei solchen kosmischen Katastrophen werden auch Röntgen- und Gammastrahlung sehr hoher Intensität emittiert. Ein Ereignis dieser Art wurde im August 1998 registriert. Hier ver-

ursachte das Sternbeben eines Neutronensternes einen Blitz aus Röntgen- und Gammastrahlen, der eine erhebliche Zunahme der Ionisation in der untersten Ionosphäre zur Folge hatte. Glücklicherweise war dieser Stern 20 000 Lichtjahre entfernt. Würde ein derartiges Ereignis innerhalb einer Entfernung von etwa 50 Lichtjahren stattfinden, so könnte allein die Röntgenstrahlung die Ozonschicht für mehrere Jahre zerstören, und die Gammastrahlen würden erhebliche Strahlenschäden in der Biosphäre verursachen.

Wirksamer Schutz vor negativen Auswirkungen des Weltraumwetters ist technisch sehr schwierig. Aber auch eine zuverlässige Vorhersage wäre schon von großem Nutzen, bedenkt man nur die Vielzahl an Schäden, die sich durch rechtzeitige Vorsichtsmaßnahmen vielleicht vermeiden lassen. In vielen Forschungsinstituten weltweit wird daran gearbeitet, die Treffsicherheit bei Vorhersagen des Weltraumwetters zu vergrößern. Hierzu ist noch viel Grundlagenforschung erforderlich. Denn in der langen Kette von Ursachen und Wirkungen von der Sonne bis zur Erde gibt es noch erhebliche Verständnislücken.

Viel wäre schon gewonnen, wenn nur das Zustandekommen der explosiven Vorgänge auf der Sonne verstanden und somit vorhersagbar würde. Dies ist ein Gegenstand besonders intensiver wissenschaftlicher Arbeit. Hier hat es in den letzten sechs Jahren erhebliche Fortschritte gegeben. Eine neue Generation von Teleskopen wurde im Weltraum stationiert und hat die Sonne rund um die Uhr fest im Blick. Zwei Instrumente des Weltraumobservatoriums SoHO sind hier an erster Stelle zu nennen: Das EUV Imaging Telescope (EIT) liefert im Minutenabstand Bilder der Sonnenscheibe im Ultraviolettlicht. Vor allem, wenn man sie in schneller Abfolge, quasi als Film, betrachtet, werden Strukturen und dynamische Vorgänge in der Korona sichtbar

### Sonne und Weltraumwetter im Internet:

<http://sohowww.nascom.nasa.gov/>  
<http://www.lmsal.com/SXT/>  
<http://vestige.lmsal.com/TRACE/>  
[http://sec.noaa.gov/ace/ACERTsw\\_home.html](http://sec.noaa.gov/ace/ACERTsw_home.html)  
<http://star.mpae.gwdg.de/>  
<http://lasco-www.nrl.navy.mil/rtmovies.html>  
<http://umbra.nascom.nasa.gov/images/latest.html>  
<http://www.sel.noaa.gov/today.html>  
<http://www.sec.noaa.gov/SWN/>  
<http://www.spaceweather.com/>  
<http://dxlc.com/solar/>  
<http://swdcdb.kugi.kyoto-u.ac.jp/dstdir/dst1/quick.html>  
<http://space.rice.edu/ISTP/>



### Literatur

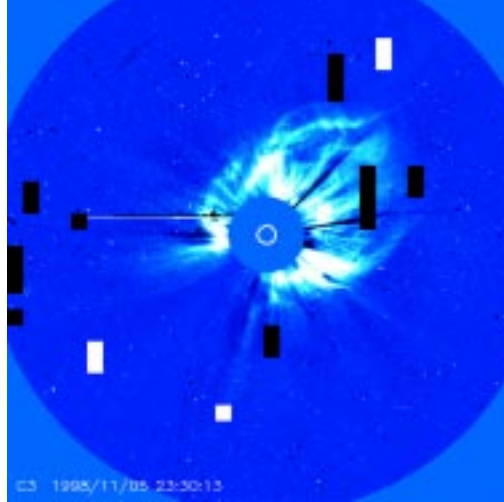
*The solar-terrestrial environment.* Von J. K. Hargreaves, Cambridge University Press, Cambridge, 1992.  
*Plasmaphysik im Sonnensystem.* Von K.H. Glassmeier und M. Scholer, (Hrsg.), BI-Wissenschaftsverlag, Mannheim, 1991.

wie nie zuvor: Protuberanzen, Flares, aktive Gebiete und Sonnenflecken, magnetische Feinstrukturen und vieles mehr. Der Large Angle and Spectroscopic Coronagraph (LASCO) beobachtet das gesamte Umfeld der Sonne, von nahe dem Sonnenrand bis auf 32 Sonnenradien Abstand. Kein CME und insbesondere kein Halo-CME kann ihm entgehen. Dabei handelt es sich um solche CMEs, die sich genau auf der Sonne-Erde-Linie bewegen. Dann erscheint die große Plasmablase auf allen Seiten der Abdeckscheibe gleichzeitig, umgibt diese quasi wie ein Halo. Nur ob das CME direkt auf die Erde zu oder von ihr weg gerichtet ist, kann mit dem Koronagraph alleine nicht entschieden werden.

EIT und LASCO zusammen ermöglichen nun erstmals eine präzise Zuordnung von Vorgängen auf der Sonnenscheibe mit CMEs. Allein die Kenntnis, ob ein Halo-CME von der Erde weg oder auf sie zu gerichtet ist, hat die Treffsicherheit der Wettervorhersage schon gewaltig erhöht. Auch die zu erwartenden Laufzeiten bis zur Erde lassen sich immer besser abschätzen.

Weitere Instrumente machen laufend Messungen von Sonnenwind, IMF, energiereichen Teilchen und dem Strahlungsfluss von außerhalb der Magnetosphäre, andere erfassen Teilchen und Ströme in der Magnetosphäre, mit Radargeräten werden Auswirkungen in der Ionosphäre und Atmosphäre untersucht. Die gesamte Kette der solar-terrestrischen Beziehungen wird jetzt beinahe lückenlos durch

**Kristian Schlegel** forscht seit 1968 am Max-Planck-Institut für Aeronomie in Katlenburg-Lindau. Seine Arbeitsgebiete sind Physik der Atmosphäre, Ionosphäre, Plasmaphysik, solar-terrestrische Beziehungen. Seit 1996 ist er außerplanmäßiger Professor an der Universität Göttingen. Er lehrte zudem an Universitäten in China, Japan, Großbritannien und den USA.  
**Rainer Schwenn**, seit 1978 ebenfalls am Max-Planck-Institut für Aeronomie, befasst sich mit der Physik der Korona



Das Halo-Ereignis vom 5. November 1998 aus der Sicht von LASCO-C3 auf SoHO. In den zwei Stunden zwischen den beiden Aufnahmen hat sich die helle Front um 10 Sonnenradien nach außen bewegt, das entspricht einer Geschwindigkeit von 1000 Kilometer pro Sekunde. 57 Stunden später setzte ein sehr starker geomagnetischer Sturm ein, nur wenige Stunden später, als aufgrund dieser Messungen vorausgesagt.

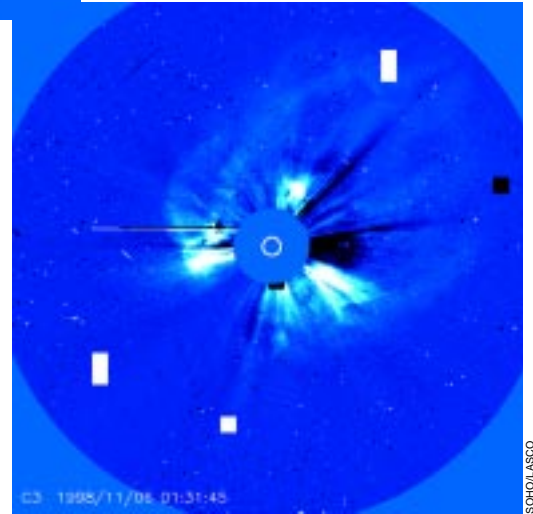
geeignete Beobachtungen abgedeckt, mit Hilfe von Raumsonden, Erdsatelliten und bodengebundenen Messanlagen.

Die meisten dieser Daten erscheinen in Beinahe-Echtzeit im Internet und sind öffentlich zugänglich. Das wird von einigen Liebhabern fleißig für private Weltraumwetterprognosen genutzt, aber auch die offiziellen Warnzentren verwerten die Daten aus dem Weltraum schon regelmäßig. Mehrere Industrieländer haben solche Warnzentren eingerichtet, die das tägliche Weltraumwetter dokumentieren und Vorhersagen veröffentlichen. Je nach der Interessenlage potenzieller Kunden sind die Vorwarnzeiten unterschiedlich lang. Die Auswirkungen der solaren Röntgenstrahlung von einem Flare etwa erreichen die Erde gleichzeitig mit den optischen Informationen. Energiereiche Teilchen als Folge eines Flares erreichen die Erde frühestens 10 bis 30 Minuten später. Geomagnetische Stürme durch CMEs setzen erst nach zwei bis vier Tagen ein.

### Suche nach Warnzeichen

Weil diese Vorwarnzeiten zum Teil unzureichend kurz sind, wird fieberhaft daran gearbeitet, mögliche Warnzeichen für bevorstehende dramatische Entwicklungen auf der Sonne zu entdecken. Ziel muss es sein, gefährliche Eruptionen zu

und des interplanetaren Plasmas. Er war an mehreren Weltraummissionen aktiv beteiligt und ist auch stark in die Planung und Vorbereitung neuer Missionen bei ESA und NASA involviert. Seit 1998 ist er außerplanmäßiger Professor an der Universität Göttingen, hält daneben Gastvorlesungen an verschiedenen Universitäten im In- und Ausland sowie viele populärwissenschaftliche Vorträge zum Thema Sonnenforschung.



erkennen (und zwar nach Zeitpunkt, Ort und Stärke), noch bevor sie eintreten. Erst wenn dies erreicht ist, könnte man beruhigt Astronauten auf die Reise zum Mars schicken. Ein wichtiger Fortschritt in dieser Richtung wurde kürzlich erzielt, und sogar die Tagespresse berichtete darüber: Fleischerhaken-ähnliche Strukturen in der Sonnenkorona (Sigmoide), im Röntgenlicht mit dem japanischen Satelliten Yokohoh beobachtet, scheinen auf bevorstehende CMEs hinzuweisen.

In Vorbereitung sind Weltraummissionen mit der speziellen Aufgabe, das Weltraumwetter besser zu verstehen. Die beiden Raumsonden der STEREO-Mission der NASA sollen nach dem Start 2006 langsam von der Erde wegdriften, die eine nach Osten, die andere nach Westen. Sie werden dann mit ihren Weitwinkelteleskopen ständig die ganze Sonne-Erde-Linie im Blick haben und die Ausbreitung von CMEs in Richtung Erde stereoskopisch verfolgen. Das neue NASA-Programm Living with a Star (LWS) umfasst eine ganze Reihe von Missionen, die sich mit der fundamentalen Abhängigkeit unseres Planeten von unserm Heimatstern beschäftigen. Das illustriert, welcher Stellenwert dem Thema Sonne und Weltraumwetter heute zugemessen wird. ■