

Space Weather  
Gefahren aus dem Weltraum?

# Space Weather

Gefahren aus dem Weltraum?

## **Umschlagbild**

Die Quellen des Weltraumwetters:  
Sonne und Sterne.

Ein zusammengesetztes Bild der Sonne und ihrer Atmosphäre am 11. August 1999 (von innen nach aussen): Die gesamte Sonnenscheibe im Ultraviolett-Bereich (Foto: Satellit Soho), Aufnahme der inneren Korona im visuellen Bereich (vom Erdboden aus während der totalen Sonnenfinsternis) und die mittlere Korona wiederum im Ultraviolett-Licht (Soho). Im Hintergrund: vereinzelte Sterne der Milchstrasse.

# Inhaltsverzeichnis

	Vorwort	4
1	Grundlagen zum Weltraumwetter	6
1.1.	Einleitung	6
1.2.	Das Einmaleins des Weltraumwetters	6
1.2.1	Die Sonne	6
1.2.2	Der elfjährige Aktivitätszyklus der Sonne	9
1.2.3	Die galaktische kosmische Strahlung	10
1.2.4	Vom geomagnetischen Feld bis zu geomagnetisch induzierten Strömen	12
1.3	Weltraumwetter und irdisches Wetter	14
2	Weltraumwetter: Praktische Konsequenzen	17
2.1	Geschichte	17
2.2	Risiken für die Elektronik	18
2.3	Risiken für die Raumfahrt	19
2.4	Risiken für die Luftfahrt	21
2.5	Risiken für die Telekommunikation	24
2.6	Risiken in der Stromversorgung	25
2.7	Risiken für die Gas- und Ölindustrie	26
2.8	Risiken für die Eisenbahn	27
3	Weltraumwetterprognosen	30
4	Weltraumwetter – was hat das mit Versicherung zu tun?	33
5	Anhang	37
5.1	Glossar	37
5.2	Quellenhinweis	39
5.3	Bildnachweis	39

Das menschliche Vorstellungsvermögen stösst bei den Dimensionen des Welt- raums rasch an Grenzen. 150 Millionen Kilometer als Entfernung Sonne/Erde oder rund 1,4 Millionen Kilometer als Sonnendurchmesser sind Zahlen, die schwer fassbar sind: Wer kann sich schon vorstellen, dass unsere Erde in der Sonne über eine Million Mal Platz fände?

Auch wenn die Sonne so weit weg ist, ist sie offensichtlich zusammen mit ande- ren Sternen Quelle von Auswirkungen, die unser Leben stärker beeinflussen als bisher angenommen. Konkret: Aus dem Weltraum wirken viele Faktoren direkt auf unsere Erde ein – nicht nur in Form lebensspendender Wärmestrahlen, sondern auch als lebensbedrohende Gefahren.

Aktuelle Medienberichte bestätigen ein gewisses Unbehagen:

- Nach dem schweren Zugsunglück in Norwegen von Anfang Januar 2000, bei dem 19 Menschen starben, vermutete ein Experte vorerst, das fatale Umschalten der Signalanlage auf «freie Fahrt» sei durch die erhöhte Sonnen- aktivität verursacht worden.
- Eine isländische Studie an 265 Piloten ergab, dass Pilotinnen und Piloten bis zu einem Viertel häufiger an Hautkrebs erkranken als andere Menschen. Grund: unregelmässige Schlafgewohnheiten und Einfluss vermehrter kosmi- scher Strahlung.
- Forscher in Amerika und Europa haben für die kommenden Monate das Maxi- mum des aktuellen Sonnenzyklus prognostiziert. Und nicht erst seit dem letzten Maximum vor rund elf Jahren sind gravierende Auswirkungen vor allem auf unsere immer stärker technisierte Welt bekannt.

Die Publikation «Space Weather – Gefahren aus dem Weltraum?» der Wissen- schaftler Dr. Frank Jansen, Berlin, und Dr. Risto Pirjola, Helsinki, hat zum Ziel, auch nicht wissenschaftliche Kreise für die Auswirkungen des so genannten Welt- raumwetters zu sensibilisieren. Sie zeigt die betroffenen Lebens- und Wirtschafts- bereiche auf und will die Assekuranz auf mögliche Schadenpotentiale aufmerksam machen. Der Publikation liegen umfangreiche Abklärungen und Gespräche mit vielen Vertretern verschiedenster Branchen zu Grunde: Luft- und Raumfahrtun- ternehmen, Energieversorgungs- und Elektronikfirmen, Telekommunikationsge- sellschaften und Eisenbahnhersteller sowie Forschungsinstitute. All diesen Perso- nen an dieser Stelle vielen Dank.

Für das Verständnis der Weltraumwetterphänomene sind gewisse physikalische Kenntnisse nötig. Der erste Teil der Publikation vermittelt diese in geraffter Form, gestützt durch ein Glossar im Anhang (im Text kursiv geschriebene Worte sind im Glossar erklärt). Ebenfalls werden die Zusammenhänge mit dem irdi- schen Wetter kurz gestreift. Teile zwei und drei schildern die Auswirkungen auf unsere technisierte Welt: Nicht nur Gefahren und mögliche Schäden werden aufgezeigt, sondern auch Fragen gestellt nach der Vorhersehbarkeit der Wirkun- gen, nach Prognosemöglichkeiten und Gegenmassnahmen. Der vierte Teil spricht die Assekuranz an: Sind die meist auf plötzliche und unfallmässige Schäden beschränkten Versicherungsdeckungen durch die neuen Erkenntnisse und Mög- lichkeiten im Bereich Weltraumwetter nun stärker oder weniger exponiert?

Wenn auch viele Fragen mit dem heutigen Wissensstand noch nicht beantwortet werden können: Zu Diskussionen werden sie mit Bestimmtheit anregen.



Abbildung 1  
Polarlichter – wie hier im nördlichen  
Finnland – entstehen durch die Kollision  
geladener Teilchen von der Sonne mit  
der Erdatmosphäre.

# 1 Grundlagen zum Weltraumwetter

## 1.1 Einleitung

Das Phänomen «Weltraumwetter» wird durch die Strahlung und durch *atomare Teilchen* von der Sonne sowie von Sternen verursacht. Weltraumwetter definiert sich somit durch die verschiedensten Wechselwirkungen zwischen der Sonne, dem Raum zwischen den Planeten (interplanetarer Raum) und der Erde. Es beeinflusst nicht nur die Funktionstüchtigkeit technischer Systeme im Weltraum und auf der Erde, sondern kann auch Gesundheit und Leben von Menschen gefährden. Die Auswirkungen sind vielfältig: Sie reichen von Elektronikpannen, unmittelbaren und langfristigen Gefahren für Astronauten und Flugzeugbesatzungen, elektrostatischen Ladungsänderungen von Satelliten, Unterbrechungen im Nachrichten- und Navigationsverkehr, Stromausfällen in der Energieversorgung bis hin zu Störungen im Bahnverkehr. Weltraumwetter ist deshalb weit mehr als die bekannte und eindrucksvolle Erscheinung der Polarlichter (Abbildung 1).

Unsere zunehmend technisierte Welt ist empfindlich auf die Sonnenaktivität und deren Schwankungen. Ein nächstes Maximum der Sonnenaktivität steht unmittelbar bevor; Wissenschaftler prognostizieren es für Mitte 2000. Um die Zusammenhänge zwischen Sonnenaktivität und möglichen Auswirkungen zu verstehen, ist ein breiteres Wissen über das Wettergeschehen im Weltraum nötig. Zudem besteht der Wunsch, drohende Gefahren aus dem Weltraum dank verbesserter Warnung frühzeitig zu erfassen. Aus diesem Grund haben NASA und ESA in Zusammenarbeit mit weiteren Raumfahrtorganisationen und wissenschaftlichen Instituten Projekte initiiert, die ein globales Weltraumwetter-Monitoring ermöglichen sollen.

## 1.2 Das Einmaleins des Weltraumwetters

Das Weltraumwetter und seine Auswirkungen werden hauptsächlich bestimmt durch die Sonne, den *Sonnenwind*, die *solare* und die *galaktische kosmische Strahlung* sowie durch den Zustand der *Magneto-*, der *Iono-* und der *Thermosphäre* der Erde.

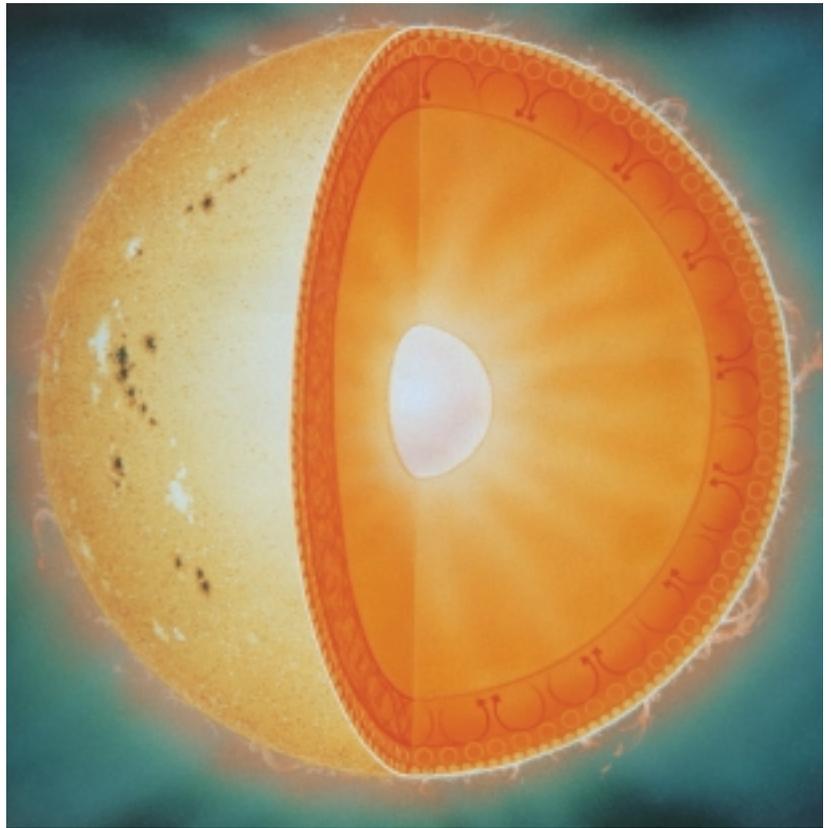
### 1.2.1 Die Sonne

Die Sonne, unser Stern, ist primäre Quelle des Weltraumwetters (Abbildung 2). Wegen der in ihr ablaufenden *Kernfusion* und der Beschleunigungsprozesse in ihrer Atmosphäre emittiert die Sonne *elektromagnetische Strahlung* und Teilchenstrahlung wie den Sonnenwind und die solare kosmische Strahlung.

Das Spektrum der elektromagnetischen Strahlung der Sonne umfasst die *Gamma-*, *Röntgen-* und *Ultraviolettstrahlung*, die Strahlung im optischen Bereich, die Wärme- oder *Infrarotstrahlung* sowie die *solare Radiostrahlung*. In all diesen Bereichen strahlt die Sonne kontinuierlich, bei Eruptionen wird die Strahlung aber um ein Vielfaches verstärkt. Glücklicherweise durchdringen die energiereichen und gefährlichen Gamma- und Röntgenstrahlen die Erdatmosphäre nicht; nur die Ultraviolettstrahlen erreichen, abgeschwächt durch die Ozonschicht, den Erdboden. Eine Gemeinsamkeit hat die elektromagnetische Strahlung der Sonne vom

Abbildung 2

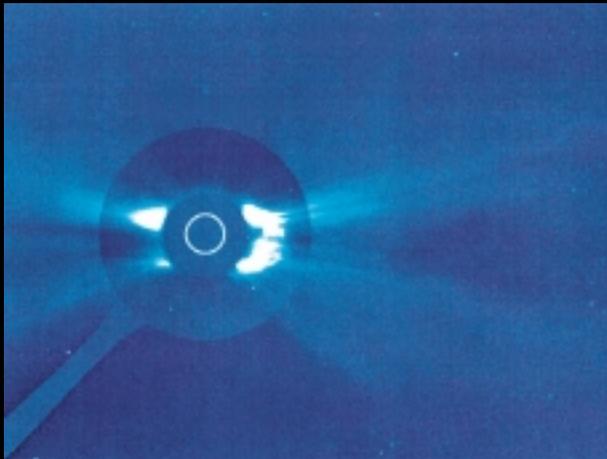
Ein Schnitt durch die Sonne. Der Abstand vom Zentrum zur innersten Schicht der Sonnenatmosphäre (*Photosphäre*) beträgt 700 000 km (Sonnenradius). Die Sonne von innen nach aussen: Die Brennzone der Kernfusion mit 13 Millionen Grad (weisser Kern), die Region mit dem Wärmetransport zur Sonnenoberfläche, die Konvektionszellen (Pfeile) als Ursachen der körnigen Struktur der Photosphäre, die *Protuberanzen* (bogenförmige helle Wolken heisser Gase) und die Sonnenflecken (dunkle Gebiete kühlerer Gase und starker Magnetfelder). Für das Weltraumwetter relevant: Der Sonnenwind, *koronale Massenausbrüche* (Coronal Mass Ejections, CMEs) und die solare kosmische Strahlung.



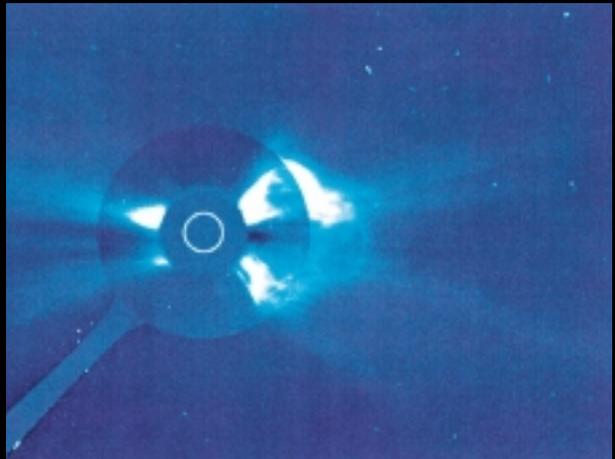
Gamma- bis zum Radiobereich: Ihre *Photonen* haben die Geschwindigkeit von 300 000 km/s (Lichtgeschwindigkeit) und legen daher die Entfernung von der Sonne zur Erde (150 Millionen Kilometer) in nur etwa 8 Minuten zurück.

Im Gegensatz zur elektromagnetischen Strahlung durchströmen die Teilchen der Sonne – der relativ langsame Sonnenwind und die schnelle solare kosmische Strahlung – die *Heliosphäre* mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten. Der Sonnenwind trägt die Teilchen im Schnitt mit 400 bis 500 km/s zur Erde. Diese Geschwindigkeit ist für die Vorhersage des Weltraumwetters wichtig: Weil der Sonnenwind in der Regel 2 bis 4 Tage von der Sonne bis zur Erde braucht, wären gewisse Schutzmassnahmen möglich.

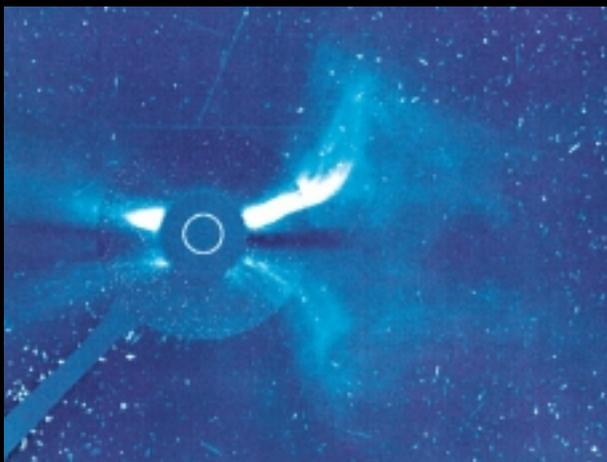
In jüngerer Vergangenheit wurde eine spezielle Form des Sonnenwinds untersucht, die das Weltraumwetter stark bestimmt: die koronalen Massenausbrüche (*Coronal Mass Ejections, CMEs*, vergleiche Abbildung 3). CMEs sind viel massenreicher und bis zu dreimal schneller als der Sonnenwind.



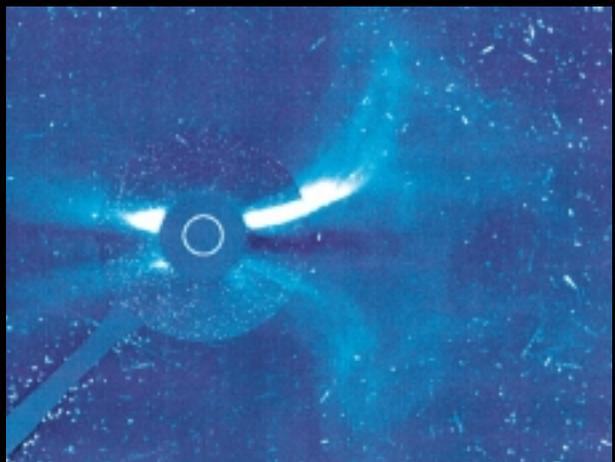
1997/11/6 12:10(C2) 11:50(C3)



12:36(C2) 12:41(C3)



13:30(C2) 13:46(C3)



14:26(C2) 14:13(C3)

Abbildung 3

Ein CME (weisse Flecken) verlässt am 6. November 1997 mit 1500 km/s die Sonne; der weisse Kreis markiert die abgedeckte Sonne (obere Bilder). In knapp zwei Stunden erreichen die ersten Protonen den Satelliten Soho (er befindet sich 1,5 Millionen Kilometer in Sonnenrichtung vor der Erde) und bewirken Störungen (helle Punkte und Striche auf den unteren Bildern).

Bei einem CME werden ungeheure Mengen (Milliarden von Tonnen) solaren Materials mit einer Geschwindigkeit von bis zu etwa 1500 km/s in die Heliosphäre geschleudert. Weil einige der CMEs mit *Protuberanzen*, *Flares* und erhöhten Strahlungsflüssen im Röntgen- und Radiobereich verbunden sind, lässt sich ihre Entstehung und Entwicklung in der Sonnenatmosphäre beobachten. CMEs enthalten viel Helium und Eisen, aber auch energiereiche atomare Teilchen wie Protonen und Elektronen, die durch starke Magnetfelder im CME zusammengehalten werden. Dadurch entstehen grosse Spannungsdifferenzen und Ströme, die für Satelliten eine erhebliche Gefährdung darstellen. Nicht nur die innere Zusammensetzung eines CME ist bestimmend für seine Auswirkungen, sondern auch die Stosswelle an seiner Vorderseite: Durch sie steigt die Dichte des Sonnenwindplasmas um etwa das Vierfache an. Die Häufigkeit der CMEs auf der Sonne beträgt ca. 3,5 Ereignisse pro Tag im Sonnenmaximum, im Sonnenminimum dagegen nur ein Ereignis alle fünf Tage. Im Sonnenmaximum erreicht ca. alle 5 Tage und im Sonnenminimum ca. alle 45 Tage ein CME den erdnahen Raum. Die grössten räumlichen Ausdehnungen können bis zu dreissig Millionen Kilometer betragen. Es wird vermutet, dass viele grosse CMEs im Erdmagnetfeld geomagnetische Stürme auslösen. Im Sonnenmaximum erwartet man etwa 12, im Sonnenminimum etwa 1,3 von CMEs verursachte geomagnetische Stürme pro Jahr auf der Erde.

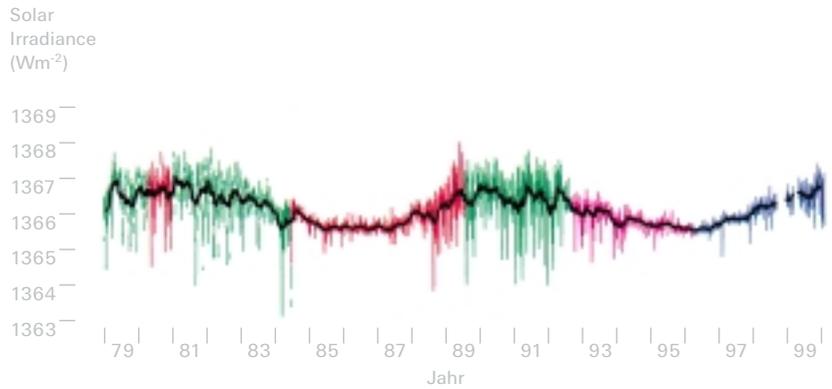
Im Gegensatz zur elektromagnetischen Strahlung der Sonne enthalten der Sonnenwind und die solare kosmische Strahlung auch atomare Teilchen von der Sonne, vorwiegend Wasserstoffkerne, aber auch schwere Eisen- und Nickelkerne. Die solare kosmische Strahlung ist wesentlich schneller als der Sonnenwind und kann Spitzengeschwindigkeiten von bis zu 100 000 km/s erreichen. Die Zeitspanne zwischen dem Aufstieg der solaren kosmischen Strahlung und der Ankunft auf der Erde liegt deshalb im Bereich von einigen zehn Minuten bis wenigen Stunden – wenig Zeit also zum Reagieren (vergleiche Abbildung 3).

### 1.2.2 Der elfjährige Aktivitätszyklus der Sonne

Schon seit langem werden die teilweise mit blossen Auge sichtbaren dunklen Flecken auf der Sonne beobachtet. Deren Häufigkeit variiert stark. Seit 1749 gibt es Monatsmittelwerte. Die Zeit zwischen zwei aufeinanderfolgenden Maxima dieser Sonnenflecken-Relativzahl beträgt im Mittel elf Jahre: Man spricht vom solaren Maximum und vom solaren Minimum. Heute weiss man, dass die Anzahl der Sonnenflecken nur das offensichtlichste Merkmal der Sonnenaktivität ist. Dank der Beobachtung durch Satelliten konnte nachgewiesen werden, dass die Anzahl der Ausbrüche (Flares), die Intensität der gesamten solaren Strahlung, der Sonnenwind und die *Solar konstante* dieser elfjährigen Periode unterliegen (Abbildung 4).

Abbildung 4

Weist auch auf die elfjährige Periode hin: Die Veränderung der Solarkonstanten an der Erde im Zeitraum von 1978 bis 1999 gemessen von verschiedenen Satelliten.



### 1.2.3 Die galaktische kosmische Strahlung

Beim Weltraumwetter gilt neben der primären Ursachenquelle Sonne die galaktische kosmische Strahlung als sekundäre Quelle. Die galaktische kosmische Strahlung besteht wie die solare kosmische Strahlung aus Kernen, Protonen und Elektronen – Materie, die von den Sternen der Milchstrasse (Galaxis) in den Weltraum geschleudert wird. Bei den sehr langen Ausbreitungsstrecken im interstellaren Raum (Raum zwischen den Sternen) wird die galaktische kosmische Strahlung durch Stosswellen nahezu auf Lichtgeschwindigkeit beschleunigt, dringt in die Heliosphäre ein und bis zur Erde vor. Zeitlich variiert jedoch die Intensität der galaktischen kosmischen Strahlung an der Erde, weil sie bei ihrem Eintritt in die Heliosphäre mit dem Sonnenwind in Wechselwirkung steht (Abbildung 5).

Abbildung 5

Das Wechselspiel von Sonnenaktivität und galaktischer kosmischer Strahlung zwischen 1950 und 1990: An der Erde ist die Intensität der galaktischen kosmischen Strahlung maximal, wenn die Sonnenaktivität im Minimum (ruhige Sonne) ist und umgekehrt (aktive Sonne). Die gemittelte Intensitätsabweichung vom Sonnenminimum zum Sonnenmaximum beträgt etwa 20%; die täglichen Abweichungen können jedoch über 200% betragen.

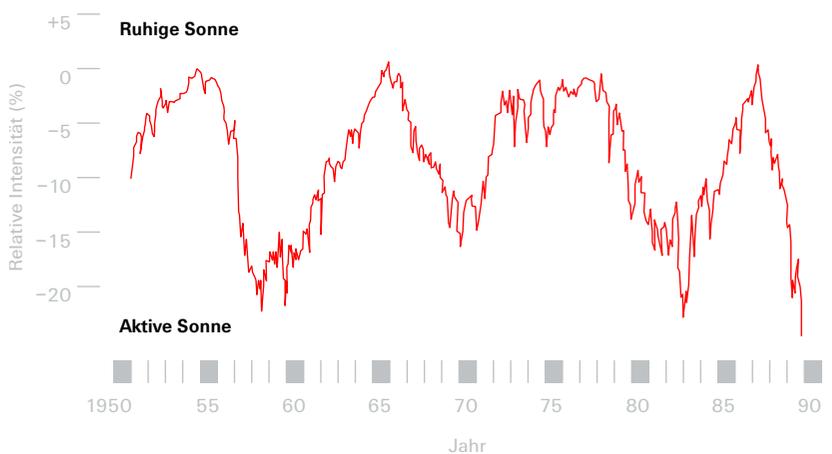




Abbildung 6  
Sterne verschiedenen Alters der Milchstrasse sind Quelle der galaktischen kosmischen Strahlung. Die sekundäre kosmische Strahlung dringt bis zum Erdboden vor, weshalb ihr technische Systeme wie Flugzeuge, Computer und Eisenbahnen ausgesetzt sind.

Obwohl die galaktische kosmische Strahlung bezüglich Intensität in Erdnähe immer geringer ist als die solare kosmische Strahlung, spielt sie wegen ihrer grossen Energie eine wesentliche Rolle beim Weltraumwetter. Genauer: Da die Geschwindigkeit der galaktischen kosmischen Strahlung nahezu Lichtgeschwindigkeit erreicht, steigt die Masse der Teilchen stark mit deren Geschwindigkeit an. Nach der Einsteinschen Beziehung zwischen Energie und Masse steigt damit auch die Energie der Teilchen. Fazit: Eine grosse Energie der galaktischen kosmischen Strahlung bedeutet gleichzeitig ein grosses Durchdringungsvermögen durch Materialien verschiedenster Art. Deshalb bildete die galaktische kosmische Strahlung bei den Apollo-Mondflügen eine erhebliche Gefahr für die Astronauten. Aber auch heute sind die Besatzungen des Space Shuttle dieser Gefahr ausgesetzt, genau wie in der geplanten Internationalen Raumstation und bei künftigen Flügen zum Mars.

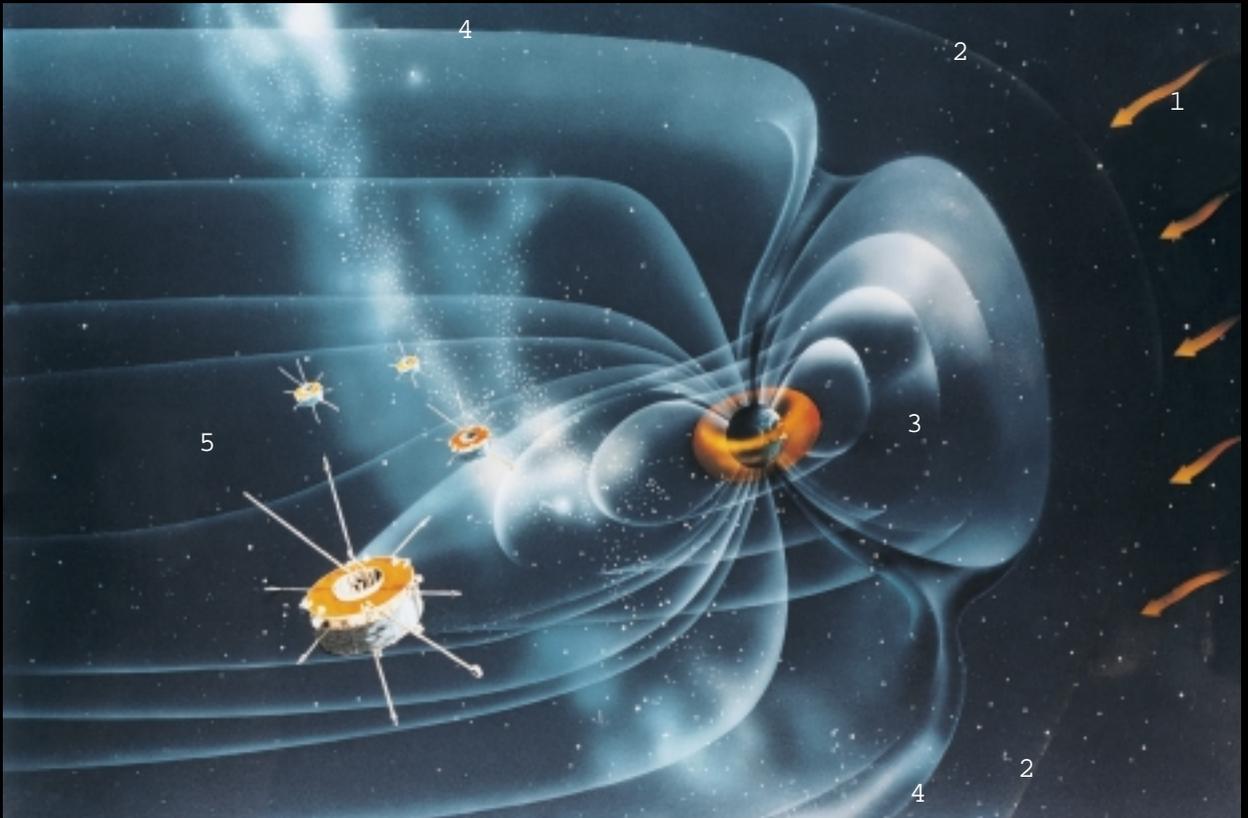
Ein weiterer wichtiger Aspekt der galaktischen kosmischen Strahlung ist die Entstehung von Teilchenschauern in der Erdatmosphäre: Weil die galaktische kosmische Strahlung mit Bestandteilen der Erdatmosphäre zusammenstösst, entstehen viele neue Teilchen (sekundäre kosmische Strahlung), die bis zum Erdboden vordringen. Auf Reiseflughöhe von Flugzeugen (10 bis 12 Kilometer) ist diese Teilchenzahl etwa 1000 mal höher als jene auf 25 km Höhe. Deshalb ist die Luftfahrt den Gefahren der kosmischen Strahlung besonders ausgesetzt.

#### 1.2.4 Vom geomagnetischen Feld bis zu geomagnetisch induzierten Strömen

William Gilbert, ein britischer Wissenschaftler, stellte im Jahre 1600 fest, dass die Erde ein grosser Magnet ist. Das geomagnetische Feld entsteht durch starke elektrische Ströme, die auf der Oberfläche des Erdkerns in einer Tiefe von ca. 2900 km fliessen. In erster Näherung ist das geomagnetische Feld dem *Dipolfeld* eines Stabmagneten ähnlich, der Magnet ist im Zentrum der Erde. Das geomagnetische Feld befindet sich in einer kontinuierlichen langsamen Veränderung. Der Zeitrahmen dieser Veränderung hat die Grössenordnung von Jahren. In Zeitperioden von Millionen von Jahren kann das Feld sich umpolen oder gar verschwinden. Gegenwärtig ist der geomagnetische Nordpol ungefähr bei 79° nördlicher Breite und 104° westlicher Länge, also oberhalb des nördlichen Polarkreises in Kanada. Durch die unterschiedlichen Lagen des geomagnetischen und des geographischen Nordpols ist die geomagnetische Breite von Nordamerika höher als die von Europa.

Der Bereich des erdnahen Weltraums, in welchem vom geomagnetischen Feld dominierte physikalische Prozesse ablaufen, ist die *Magnetosphäre*.

Gleich unter der Magnetosphäre (Abbildung 7) schliesst sich in einer Höhe von 1000 Kilometern die obere Schicht der Erdatmosphäre an, die Ionosphäre, die bis 70 Kilometer über die Erdoberfläche reicht. Die Ionosphäre enthält viele positiv und negativ geladene Teilchen, weshalb sie sich wie ein *Plasma* verhält: Die elektromagnetischen Wechselwirkungen zwischen den Teilchen sind beträchtlich. Deshalb beeinflusst die Ionosphäre Radio- und Funksysteme entscheidend: Die Wellen werden in Abhängigkeit der Frequenz von der Ionosphäre reflektiert,



**Legende**

- 1 Sonnenwind
- 2 Stoßfront
- 3 Van-Allen-Gürtel
- 4 Magnetopause
- 5 Plasmaschicht

**Abbildung 7**

Der Sonnenwind trifft auf das Erdmagnetfeld und gibt der Magnetosphäre eine kometenähnliche Form mit einer scharfen Begrenzung auf der sonnenzugewandten Seite – ungefähr 60 000 km vor der Erde und einem Schweif von bis zu einer Million Kilometer Länge auf der Nachtseite der Erde. Im *Van-Allen-Gürtel* sind besonders viele Teilchen der kosmischen Strahlung enthalten. Ab 2000 untersuchen die vier Cluster-Satelliten der ESA die Prozesse in der Magnetosphäre detaillierter.

gebrochen oder gehen unverändert durch. Bei stürmischen Weltraumwetterbedingungen können sich die Eigenschaften der Ionosphäre derart ändern, dass die Ausbreitung der Radiowellen massiv gestört wird.

Wenn der Sonnenwind besonders schnell wird, viele geladene Teilchen mit sich trägt und auf die Magnetosphäre trifft, bringt dessen Magnetfeld die geladenen Teilchen bis weit hinunter in die Erdatmosphäre und besonders in hohe geographische Breiten. Deshalb sind dort Polarlichter zu sehen (Abbildung 1). Die Teilchen von der Sonne verursachen zeitlich veränderliche Ströme in *Ionosphäre* und Magnetosphäre. Diese Ströme verursachen dort ein Magnetfeld. Dieses induziert ein elektrisches Feld (Faraday's Induktionsgesetz), welches Ströme in der Erde produziert.

Zudem bedingt dieses elektrische Feld Spannungen zwischen verschiedenen Punkten an der Erdoberfläche. Folge ist auch ein Spannungsunterschied beispielsweise zwischen den Erdungspunkten zweier Transformatoren. Deshalb fließt ein Strom im Hochspannungskabel, das die Transformatoren verbindet. Dieser Strom wird als *geomagnetisch induzierter Strom (Geomagnetically Induced Current, GIC)* bezeichnet.<sup>1</sup>

Das geoelektrische Feld erzeugt GICs nicht nur in Energieübertragungssystemen, sondern auch in anderen technischen Leitern wie Öl- und Gaspipelines, Telekommunikationskabeln und Eisenbahninstallationen. Im allgemeinen sind GICs die ursprüngliche Quelle für Probleme in solchen Systemen: Bei Stromversorgern können die Transformatoren durch diese Effekte in die Sättigung geraten, was zu Notabschaltungen oder zur Zerstörung des Systems führt. GICs können Korrosion in Pipelines und Probleme bei Korrosionskontrollmessungen, Störungen von Telekommunikationssignalen, Totalschäden bei Bauteilen und Fehlfunktionen im Eisenbahnverkehr verursachen. Ähnlich wie in Pipelines, Strom- und Telekommunikationskabeln fließen GICs in allen grossen metallenen Konstruktionen wie zum Beispiel Brücken oder Eisenbahnschienennetze. Keines dieser Systeme ist bis anhin ausreichend auf mögliche Auswirkungen der GICs untersucht worden. Korrosionsprobleme bei Brücken könnten ähnlich wie bei Pipelines darauf zurückzuführen sein. Ausserdem ist in allen fest geerdeten metallenen Konstruktionen GIC-bedingte Korrosion möglich, zum Beispiel bei Hochspannungsmasten.

### 1.3 Weltraumwetter und irdisches Wetter

Zusammenhänge zwischen Weltraumwetter und irdischem Wetter sind ein kontrovers diskutiertes Thema: Gibt es Korrelationen zwischen den beiden Phänomenen? Grundsätzlich ist bis heute unklar, wie stark Weltraumwettereffekte das Wetter auf der Erde mitbestimmen. Mögliche Verbindungen sind nicht einfach aufzuzeigen, gewisse Hinweise sind jedoch unverkennbar. So sind Lichtblitze bekannt, die sich von der oberen Seite von Gewitterwolken aufwärts in die Ionosphäre bewegen. Deshalb kann man in einem solchen Fall von der Entstehung eines atmosphärischen Stromkreises ausgehen – was zumindest ein klarer Beweis für eine elektrische Kopplung zwischen irdischen Wetterprozessen und der Ionosphäre ist.

Auch weitere Aspekte sind noch nicht abschliessend erforscht: Während Weltraumwetterstürmen dringt eine grosse Zahl von energiereichen Teilchen in die Atmosphäre ein. Bei Höhen von einigen zehn Kilometern tragen sie wahrscheinlich zu chemischen Reaktionen bei, die Stickoxid-Verbindungen entstehen lassen. Diese wiederum können einen Anstieg der Ozonkonzentration in geringeren Höhen bewirken.

Oder: Die galaktische kosmische Strahlung enthält Teilchen mit sehr hoher Energie. Diese Teilchen dringen bis auf Wolkenhöhe, d.h. bis in einige Kilometer über der Erdoberfläche vor. In der Atmosphäre verursacht diese energiereiche kosmische Strahlung die Ionisation von atmosphärischen Teilchen, was Effekte auf die Wolkenformationen haben kann.

Das Funktionieren dieser Prozesse und ihre Bedeutung stellen die Forschung vor grosse Herausforderungen. So könnten eventuell aus dem gezeigten Zusammenhang zwischen verringerter Sonnenaktivität und ansteigender Intensität der galaktischen kosmischen Strahlung (Abbildung 5) Folgen für die Wolkenentstehung abgeleitet werden: Vielleicht ist die weltraumwetterbedingte Wolkenentstehung in Zeiten des Sonnenaktivitätsminimums am grössten.

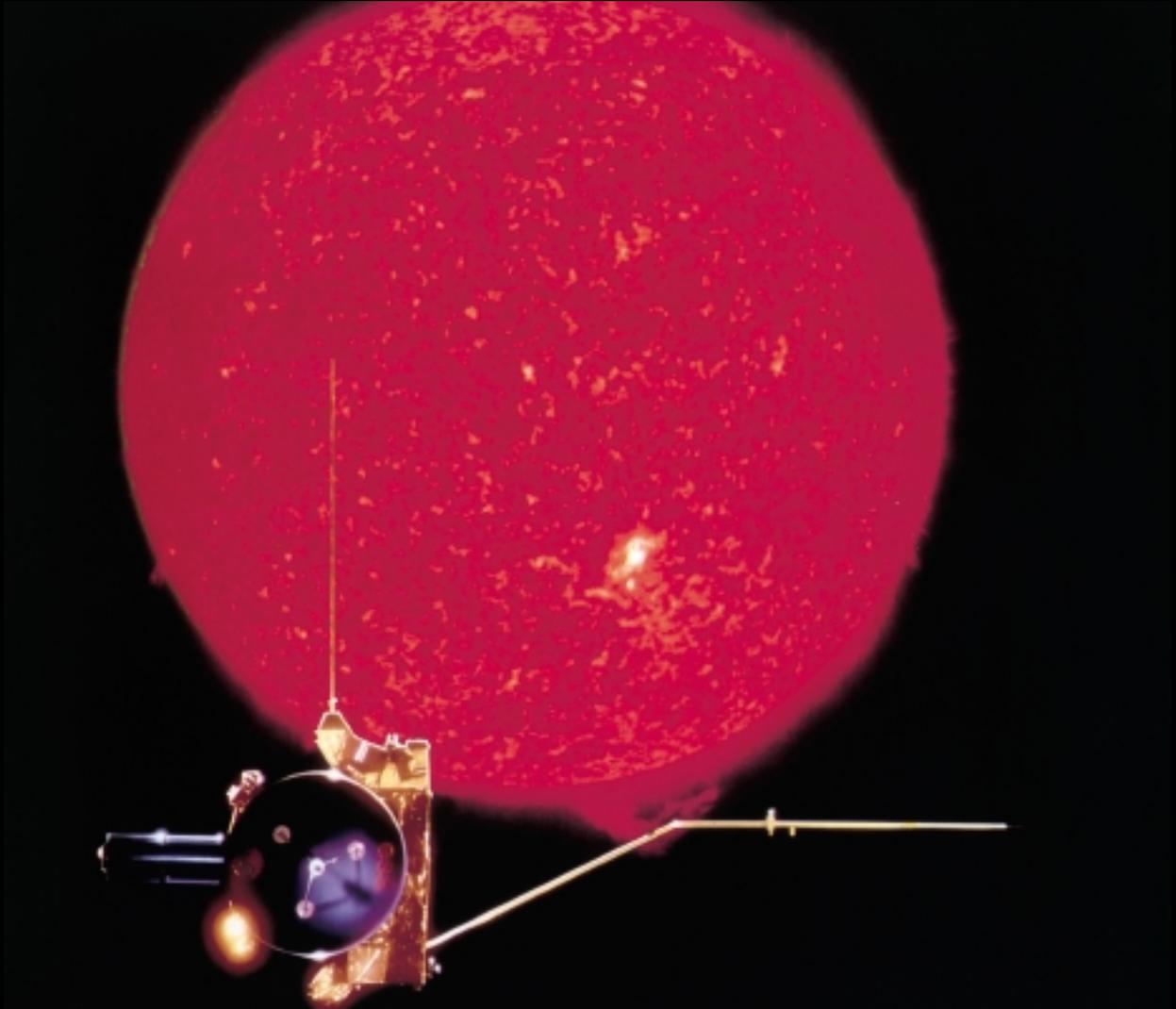


Abbildung 8  
Fotomontage der Ulysses-Sonde und einer  
Aufnahme der Sonne durch den Satelliten  
Soho.

## 2 Weltraumwetter: Praktische Konsequenzen

### 2.1 Geschichte

Die ersten Beobachtungen von Einflüssen des Weltraumwetters auf technische Systeme lassen sich bis in die Pioniertage der Telegrafie Mitte des 19. Jahrhunderts zurückverfolgen. Während zwei geomagnetischen Stürmen in den Jahren 1847 und 1859 waren alle Telegrafleitungen in Grossbritannien unbrauchbar. Seit diesen ersten Feststellungen sind Störungen in Telegraf- und Telefonsystemen regelmässig bei grossen magnetischen Stürmen – ein bis zwei Mal pro Sonnenfleckenzyklus – aufgetaucht. 1921 und 1958 verursachten in Schweden derart induzierte Ströme Feuer in Telegrafieausrüstungen. Im Februar 1958 war das transatlantische Kommunikationskabel einem magnetischen Sturm stark ausgesetzt: Als Folge wurden die Signale – in Abhängigkeit der Richtung der induzierten Spannung zur Arbeitsspannung – zu lautstarken Tönen oder zu schwachem Flüstern verzerrt.



Abbildung 9  
Der geomagnetische Sturm vom 13. März 1989 zerstörte diesen Transformator in New Jersey, USA

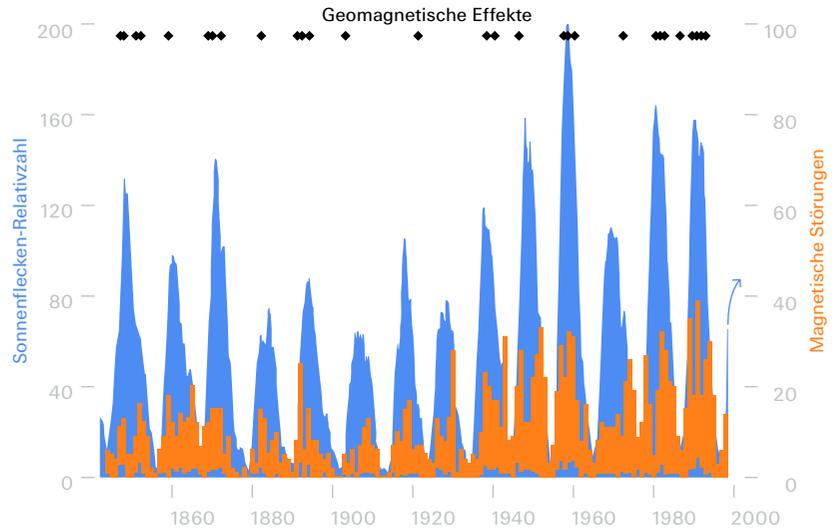
Die ersten Effekte an Stromübertragungssystemen traten in Nordamerika 1940 während eines starken magnetischen Sturms auf: Spannungsschwankungen und Abschaltungen von Transformatorausrüstungen. Andere Stürme in Nordamerika verursachten Leitungsabschaltungen und Blackouts in der Elektrizitätsversorgung. Das berühmteste Ereignis fand während eines grossen magnetischen Sturms am 13. März 1989 statt (Abbildung 9). Geomagnetisch hervorgerufene Stürme verursachten die Sättigung von Transformatoren im Hydro-Québec-Kraftwerkssystem, die Selbstabschaltung von Geräten, Spannungssoszillationen und Schwingungen im Spannungssystem, was schliesslich zum Kollaps des ganzen Systems durch einen Kaskadeneffekt führte. Der Stromausfall in Québec dauerte 9 Stunden.

Öl- und Gaspipelines sind elektrische Leiter, die sich oft über Hunderte und Tausende von Kilometern erstrecken. Schon vor einigen Jahrzehnten konnte bei Arbeiten an einer langen Gaspipeline in Kanada das Auftreten von Strömen nicht mit üblichen Stromquellen erklärt werden. Diese Ströme korrelierten mit geomagnetischen Störungen. Viele Studien über geomagnetische Effekte wurden im Zusammenhang mit dem Bau der Trans-Alaska-Pipeline – sie befindet sich in der Polarlichtregion – in den siebziger Jahren gemacht. Störungen geomagnetischen Ursprungs sind auch bei Pipelines in Äquatorregionen vorgekommen.

Im Juli 1982 traten in Schweden auf Weltraumwettereffekte zurückzuführende Spannungsänderungen auf, die zu Fehlfunktionen bei Eisenbahnsignalen führten. Abbildung 10 zeigt für die letzten zwei Jahrhunderte eine Zusammenfassung der Sonnenflecken-Relativzahl, der magnetischen Aktivitäten und bedeutender Probleme bei technischen Systemen auf der Erde. Der elfjährige Aktivitätszyklus der Sonne ist klar zu erkennen, ebenso die Abhängigkeit der magnetischen Aktivität von der Sonnenflecken-Relativzahl. Zu den meisten Problemen kam es beim Sonnenfleckenmaximum. Technische Systeme wurden aber auch in Zeiten des Sonnenfleckenminimums durch grosse magnetische Stürme gestört.

Abbildung 10

Die Sonnenflecken-Relativzahl seit 1845 (blaue Flächen) und die magnetischen Störungen (orange Balken). Die schwarzen Diamanten am oberen Rand markieren Zeitpunkte grösserer Probleme in technischen Systemen aufgrund geomagnetischer Effekte.<sup>1</sup>



Lange Zeit kannte und verstand man die umfangreichen Phänomene des Weltraumwetters nicht. Deshalb blieben die kosmischen Ursachen für Störungen technischer Systeme unerkannt. Weil das Weltraumwetter auch nur Teile von Ausrüstungen beschädigen kann, zum Beispiel Isolierungen in Transformatoren, wird in solchen Fällen oft etwas Anderes als primäre Ausfallursache vermutet, nicht aber ein Zusammenhang mit dem Weltraumwetter.

## 2.2 Risiken für die Elektronik

Elektronische Bauelemente sind aus unserer Industriegesellschaft nicht mehr wegzudenken. Über Jahrzehnte wurden sie immer kleiner gebaut, mit geringeren Spannungen und weniger Elektronenflüssen. IBM-Experten<sup>2</sup> gehen seit etwa 1978 davon aus, dass so genannte Soft Errors in Computern auch elektronisches Rauschen hervorrufen. Soft Errors sind spontane Fehler oder Änderungen der gespeicherten Information, die nicht reproduziert werden können. Soft Errors auf der Chip-Ebene wirken sich meist nicht unmittelbar auf die Funktionsweise eines Computers aus, weil sich das System ausschalten kann, bevor ein nicht korrekt gesetzter Informationsbit benutzt wird.

Auf der Erde werden die Soft Errors zum Beispiel durch die Teilchenschauer der galaktischen kosmischen Strahlung hervorgerufen. Die kosmische Strahlung auf *LSI*-Bauelemente bewirkt, dass die *Neutronen* und *Pionen* auf das Substrat – ein Siliziumatom – treffen und im zerteilten Silizium einen Elektronensturm produzieren. Dieser kann elektronische Systeme stören. So untersuchte IBM im Februar und März 1987 – also nicht im Sonnenmaximum – *SRAM*-Speicherchips in Leadville (Colorado, Höhe 3100 m.ü.M.). Das Ergebnis: Die Speicherchips zeigten eine Fehlerrate von mehreren Fehlern pro Woche. Im Vergleich dazu ist

die Rate auf Meereshöhe etwa 13 Mal kleiner. Der Grund: Die kosmische Strahlung ist dort weniger häufig. Allerdings hängt die Fehlerrate und damit das Risiko der Beeinflussung von Computerspeichern nicht nur von der Höhe des Ortes über Meer ab, sondern auch von der geomagnetischen Breite und Länge, da die kosmische Strahlung in Abhängigkeit dieser Grössen auf die Erdoberfläche trifft: So treten die Neutronen an den Polen etwa sechsmal häufiger auf als am Äquator, weil das Erdmagnetfeld einem Dipolmagnetfeld ähnlich ist, wodurch der Abschirmeffekt am Äquator maximal und an den Polen minimal ist.

### 2.3 Risiken für die Raumfahrt

Satelliten verbringen meist mehrere Jahre im Weltraum. Deshalb sind sie kurz- und langfristigen Einflüssen des Weltraumwetters ausgesetzt. So beträgt zum Beispiel im Sonnenmaximum die Wahrscheinlichkeit über 95 %, dass während einer einjährigen Missionsdauer eines Satelliten ein solarer Flare auftritt. Dabei kann ein 100 MeV-Proton (lies für MeV: Millionen Elektronenvolt) etwa 40 mm Aluminium und ein 3 MeV-Elektron ungefähr 6 mm Aluminium mühelos durchdringen. Aus diesem Grund dürfen zum Beispiel Astronauten bei solaren Flares den Space Shuttle für Weltraumspaziergänge nicht verlassen.

In jüngerer Vergangenheit liess sich ein Zusammenhang zwischen Weltraumwetter und seinen Auswirkungen auf elektronische Bauelemente und Satelliten eindeutig feststellen. Eine Studie<sup>3</sup> berichtet von 31 Unregelmässigkeiten bis hin zum Totalausfall von Satelliten, und zwar im erdnahen Weltraum wie auch auf interplanetaren Flügen. Die bekanntesten sind die Störungen bzw. Ausfälle der kanadischen Kommunikationssatelliten ANIK am 20./21. Januar 1994 und des Telstar 401 Satelliten am 11. Januar 1997 – Ereignisse, die nicht im Sonnenmaximum stattfanden. Bei den ANIK-Satelliten führten Elektronen zum Verlust der Bahnkontrolle. Telstar 401 wurde wahrscheinlich durch einen CME funktionsunfähig. Die berühmte Pioneer-Sonde der NASA war beim Jupiter verstärkt einem Teilchenschauer ausgeliefert, und auch Voyager 1 bekam während ihres mehrjährigen interplanetaren Fluges die Auswirkungen des Weltraumwetters zu spüren: Wiederholt verursachte die kosmische Strahlung das Aussetzen der gesamten Energiezufuhr, jedes Mal war ein Wiederanschalten nötig. Die Palette der Weltraumwetterauswirkungen ist vielfältig: Sie reicht von falsch gehenden Uhren auf den GPS-Satelliten über Ausfälle von einzelnen Instrumenten bis hin zur Auf- oder Entladung von Satelliten.

#### *Das Ereignis vom 7. bis 10. Januar 1997*

Am 17. Januar 1997 berichtete CNN in seinem Financial Network: «Telstar 401 out of service: Satellite's failure could cost AT&T several hundred million dollars». AT&T hatte bekannt gegeben, dass Versuche, den Kontakt mit dem Satelliten Telstar 401 wieder aufzunehmen, erfolglos geblieben waren. Deshalb müsse der Satellit als Totalverlust gelten. Durch diesen Verlust sank der Wert des bis dahin aus drei Satelliten bestehenden und für die Übertragung von TV-Programmen verwendeten Skynet Satellite Service erheblich. Der Totalschaden kostete die Versicherungsindustrie übrigens USD 135 Millionen, die Folgeschäden waren nicht versichert. Was war die Ursache dieses ungewöhnlichen und abrupten Ausfalls des erst drei Jahre alten Satelliten? Telstar 401 fiel genau in jenem Zeitraum aus, als ein grosser geomagnetischer Sturm auftrat. Am 10. Januar 1997 – dem Tag der

Ankunft des Sturms an der Erde – hatte man bei einem anderen Satelliten eine Aufladung von  $-800\text{ V}$  statt der üblichen  $-100$  bis  $-500\text{ V}$  gemessen. Dass solche elektrischen Spannungen extreme Auswirkungen auf die Elektronik von Satelliten haben, ist bekannt. Am gleichen Tag liess sich in den Nachmittagsstunden mit so genannten *Neutronenmonitoren* auf Hawaii und in Colorado auch auf der Erde ein erhöhter Teilchenfluss messen.

1,5 Millionen Kilometer vor der Erde in Sonnenrichtung steht der ESA Satellit Soho. Schon in den frühen Morgenstunden des 10. Januar 1997 konnte er wegen seiner grösseren Nähe zur Sonne einen Anstieg der Sonnenwindgeschwindigkeit messen, die durch einen CME verursacht worden waren.

In der Raumfahrt kann es zu folgenden Effekten kommen:

- a) Satelliten laden sich auf wegen
  - ihrer periodischen Bahnen durch die «Van-Allen-Gürtel»,
  - ihrer Bahnen über die Polregionen der Erde und über die Südatlantikanomalie (eine Region über dem Südatlantik, wo das Erdmagnetfeld schwächer ist),
  - der Flüge im erdnahen und interplanetaren Weltraum,
  - der erwähnten energiereichen Teilchenstürme. So dringen die energiereichen Elektronen tief in die Elektronik der Satelliten ein.
- b) Energiereiche Elektronen ermöglichen *dielektrische* Aufladungen von ungeschützten Satellitenteilen. Beispiel: Bei den kanadischen Kommunikationssatelliten ANIK E-1 (war für USD 150 Mio. versichert) und E-2 traten Probleme auf, als sich in ihrer Umgebung energiereiche Elektronen häuften. Zudem: Dielektrisch aufgeladene Satellitenteile und metallische Oberflächen der Satelliten verfügen über eine grosse Potentialdifferenz. Folgen sind Entladungen mit kurzzeitigen elektrischen Stromstössen und Materialzerstörungen.
- c) Kurzzeitige elektrische Stromstösse von Ent- und Aufladungen im Inneren des Satelliten können so genannte Phantom-Kommandos bewirken. Folgen: Verluste von Instrumenten, Stromversorgungs- oder Triebwerkskomponenten. Die kurzzeitigen elektrischen Stromstösse treten wegen der bevorzugten Bewegungsrichtung der Elektronen bei geomagnetischen Störungen aus dem magnetischen Schweif der Erde häufig zwischen Mitternacht und Morgen auf.

Die langfristigen Weltraumwettereinflüsse sind nicht nur Folge der galaktischen kosmischen, sondern auch der solaren UV-Strahlung. In Abhängigkeit von der Bahnhöhe sind die Elektronik, die Solarzellen und die verwendeten Werkstoffe selbst gefährdet. Zudem ist die solare UV-Strahlung oberhalb der schützenden Atmosphäre intensiver, weshalb einige Werkstoffe brüchiger werden.

Schon oft konnte der Zeitpunkt des Verglühens und Auftreffens von Satellitenteilen auf der Erdoberfläche nur spät und ungenau angegeben werden, weil Weltraumwettereffekte ein nicht kalkulierbares Abbremsen der Satelliten bewirken. Bekanntlich dehnt sich die Erdatmosphäre durch zusätzliche Energiezufuhr aus, zum Beispiel während der Ankunft von solaren Teilchenstürmen, durch erhöhte Sonnenaktivität und durch solare UV-Strahlung im elfjährigen Zyklus. Es kommt zu vermehrten Kollisionen von Satelliten mit diesen mikroskopischen Teilchen und dadurch zur abrupten oder kontinuierlichen Abnahme der Bahn-

höhe von Satelliten im Erdorbit. Gefährlich ist dies, weil es zum zeitweisen Verlust der Kommunikation mit Satelliten führen kann. Bei den viele Jahre im Erdorbit verweilenden Raumflugkörpern – wie das Hubble-Weltraumteleskop oder die künftige Internationale Weltraumstation – sind immer wieder Korrekturschübe auf höhere Bahnen zur Kompensation der Bahnverluste nötig (Abbildung 12, nächste Seite).

## 2.4 Risiken für die Luftfahrt

Besatzungen, Passagiere und Bordelektronik unterliegen beim Fliegen der unmittelbaren Beeinflussung durch die in der Erdatmosphäre produzierte sekundäre kosmische Strahlung. Dabei werden die meisten Teilchen der sekundären kosmischen Strahlung gerade in der Reiseflughöhe von Verkehrsflugzeugen gemessen. Zur Erforschung der Zusammenhänge von Strahlungsfeld und Exposition in der Luftfahrt wurde 1994 eine durch die Europäische Kommission geförderte Studie begonnen. Der von Wissenschaftlern unterschiedlicher Disziplinen in Zusammenarbeit mit verschiedenen internationalen Fluggesellschaften erarbeitete und 1999 veröffentlichte Abschlussbericht<sup>4</sup> zeigt Interessantes (Abbildung 11 enthält in der dritten Spalte die gemessene Dosisleistung für den energiereichen Teil, in der vierten Spalte die berechnete Dosisleistung für den weniger energiereichen Teil der kosmischen Strahlung): Bei den Flügen in Europa beträgt die Strahlungsbelastung das Dreifache der Belastung bei Flügen über den Äquator. Flüge in hohen Breiten von Europa nach Nordamerika sind etwas strahlungsbelastender als entsprechende Flüge ostwärts. Bei Überschallflügen mit der Concorde von London nach New York ist mit einer doppelten Strahlungsbelastung im Vergleich zu herkömmlichen Flügen zu rechnen. Aus der Abbildung lassen sich auch Fragen ableiten, zu denen die Antworten noch nicht bekannt sind: Wie hoch sind die Dosisleistungen im Maximum der Sonnenaktivität bzw. wie verändert sich die Dosisleistung über einen ganzen Aktivitätszyklus der Sonne? Ist die höhere Dosisleistung bei den Flügen Mailand–Tokio gegenüber den Flügen Mailand–Los Angeles darauf zurückzuführen, dass die Messungen Mailand–Tokio nicht mehr während des solaren Minimums (um 1995) erfolgten?

Abbildung 11

Die Dosisleistung für verschiedene Flugrouten gemessen von Mai 1993 bis Februar 1998: London–New York (British Airways Concorde), Europa (irisches Regierungsflugzeug), Dublin–New York (Aer Lingus), Mailand–Los Angeles (Alitalia), Mailand–Tokio (Alitalia) und Rom–Rio de Janeiro (Alitalia). Auffällig: Bei den Überschallflügen war die gemessene Strahlenbelastung nahe der Grenze der zulässigen mittleren Dosisleistung gemäss Strahlenschutzverordnung für beruflich strahlenexponierte Personen von etwa 7,5  $\mu\text{Sv/h}$  (lies Mikrosievert pro Stunde).

Flugstrecke	Datum der Exposition	Dosisäquivalent (CR-39) (ICRP 60) $\mu\text{Sv}/\text{hour}$	Total Dosisäquivalent (LWIN 98F) (ICRP 60) $\mu\text{Sv}/\text{hour}$
<i>Überschall</i>			
London–New York	Dez.94–Jul.95	7.24±0.29	11.4
London–New York	Dez.96–Jun.97	7.13±0.56	11.3
London–New York	Jul.97–Feb.98	6.99±0.64	11.1
<i>Unterschall</i>			
Irisches Regierungsflugzeug (Europa)	Mai 93–Dez.93	4.03±0.33	–
Dublin–New York	Mai 93–Dez.93	3.56±0.13	5.6
Mailand–New York	Herbst 95–Frühjahr 96	2.99±0.29	5.4
Mailand–Tokio	Mai 97–Jul.97	3.13±0.52	5.0
Rom–Rio de Janeiro	Okt.96–Dez.96	1.19±0.12	2.0



Abbildung 12

Der NASA-Satellit LDEF (Long Duration Exposure Facility) hatte keine Schubdüsen. Während des letzten Sonnenmaximums verlor er schneller an Höhe als angenommen, so dass er etwa 6 Wochen vor einem unkontrollierten Absturz im Januar 1990 vom Space Shuttle zur Erde zurück gebracht werden musste.

Ein weiteres Ergebnis: Erstmals wurden bei herkömmlichen Flügen Atomkerne von Sauerstoff und bei Überschallflügen die noch schwereren von Eisen entdeckt. Der Anteil der Atomkerne, die schwerer als jene von Helium sind, liegt bei Überschallflügen im Bereich von 2%, bei herkömmlichen Flügen von 0.5%. Da Atomkerne mit steigender Masse stärkere Spuren in der Substanz hinterlassen, auf die sie treffen, ist es wichtig zu wissen, wie sich diese Ionisation auf Besatzungen und Passagiere auswirkt.

Bei den erwähnten Messungen spielen allerdings Flugroute, Flughöhe und zum Teil Flugzeugtyp eine entscheidende Rolle.<sup>5</sup> So sind Flugrouten in hohen nördlichen Breiten weltweit üblich geworden (kürzere Flugwege), wegen des geomagnetischen Nordpols und des tieferen Eindringens der galaktischen kosmischen Strahlung in die Erdatmosphäre jedoch strahlungsintensiver. Da die normale Reise Flughöhe von Überschallflugzeugen (16 km) im Vergleich zur Reise Flughöhe von Unterschallflugzeugen (10 km) ungefähr um die Hälfte näher an der Höhe der Maximumintensität der Teilchenschauer liegt, ist bei Überschallflügen die Strahlungsdosis beträchtlich höher. Die Cockpitbesatzung ist wegen der Verglasung dem Strahlungsfeld noch stärker ausgesetzt als die im Flugzeugrumpf besser geschützten Menschen. Vor diesem Hintergrund hat der Europäische Rat vorgeschlagen, Flugzeugbesatzungen ab 2000 als strahlungsexponierte Personen zu behandeln, die pro Jahr nicht mehr als 6 mSv Strahlung aufnehmen sollten, immerhin das Doppelte der natürlichen Dosis auf dem Erdboden.

Da auch die Bordelektronik moderner Flugzeuge mit Mikrochips bestückt ist, die mit geringen Strömen bzw. Spannungen arbeiten, sind die Folgen des Strahlungsfelds für die Luftfahrt ähnlich jener in Kapitel 2.2 beschriebenen Konsequenzen für die Elektronik im allgemeinen. Bordelektronik-Equipment, das mit *CMOS* Halbleitern bestückt ist und mit 2,5V arbeitet, zeigte bei softwaremässigen Fehlern (Soft Error Rate, SER) einen Anstieg um 100%, wenn die Flughöhe von 9 auf 20 km geändert wurde. Im übrigen ist die SER, bedingt durch die grössere Teilchenstrahlung, auf Flughöhe bedeutend grösser als auf Meereshöhe: Auf 9 km zum Beispiel etwa um den Faktor 15.

Die geschilderten Untersuchungen erfolgten im Zeitraum des Sonnenminimums und differenzieren nicht zwischen den Folgen der solaren und der galaktischen kosmischen Strahlung. So erfolgten die Messungen meistens über Hunderte von Stunden, weshalb kaum Aussagen über die Ankunftszeiten von den durch die Sonne verursachten Weltraumwettereffekten auf der Reishöhe von Flugzeugen gewonnen werden konnten. Was aber sind die Folgen des Weltraumwetters für den weiterhin kräftig wachsenden globalen Luftverkehr? Werden auf Grund routinemässiger Weltraumwetterberichte den Besatzungen im Bereich der Streckenplanung südlichere oder in geringeren Höhen verlaufende Routen vorgeschlagen? Welcher Art werden die Sicherheitsmassnahmen besonders für das fliegende Personal bei Überschallflügen sein, damit die Menschen nicht mehr als der vom Gesetzgeber erlaubten maximalen, stündlichen Strahlungsdosis ausgesetzt sind? Grosse Aufgaben in der Erforschung, Überwachung und Minimierung der Strahlenbelastung zeichnen sich ab.

## 2.5 Risiken für die Telekommunikation

Wie im Kapitel «Geschichte» erwähnt, gehen die ersten Beobachtungen von Effekten des Weltraumwetters auf technische Systeme auf die Pionierzeit in der Telegrafie zurück. Seither sind immer wieder Störungen in Form von Überspannungen, Betriebsunterbrechungen und Feuer nachgewiesen worden – Störungen, die durch geomagnetisch induzierte Ströme verursacht wurden. Es gibt auch gute Gründe zur Annahme, dass einige rätselhafte Unterbrechungen im Bereich der Telekommunikation durch GICs verursacht worden sind. Deshalb ist es aufschlussreich, Störungsstatistiken mit geomagnetischen Aktivitäten zu vergleichen.

Das Prinzip der Entstehung von GICs in Telekommunikationskabeln ist gleich wie bei Stromnetzwerken und Pipelines. Ursache ist ein geoelektrisches Feld, hervorgerufen durch eine magnetische Störung. Berichte über solche Störungen eröffnen die Möglichkeit, die Stärke geoelektrischer Felder abzuschätzen, weil man das Maximum der Überspannung des betroffenen Gerätes kennt. Während eines magnetischen Sturmes im März 1940 im nördlichen Norwegen lag der Wert des geoelektrischen Feldes ungefähr zwischen 45 und 55 Volt pro Kilometer – der höchste Wert, der in der Literatur erwähnt ist. Es ist wahrscheinlich, dass die heutige Generation von Telekommunikationskabeln GICs weniger gut überträgt. Moderne Systeme hingegen beinhalten immer komplexere elektronische Komponenten. Um sicher zu sein, ob auftretende Phänomene im Zusammenhang mit GICs stehen, sind entweder vertiefende Modellberechnungen oder Messungen über eine genügend lange Zeitperiode durchzuführen. Nur so sind statistische Schlussfolgerungen möglich. Für die Statistiken ist die minimal erforderliche Zeit ein Aktivitätszyklus der Sonne (vergleiche Kapitel 1.2.2). Bei den heute verwendeten optischen Faserkabeln sind GICs zu beachten, weil sie metallische Kabel für die Spannungszufuhr zu den Verstärkern, für die mechanische Stabilität und die Ummantelung enthalten.

Die Länge insbesondere von Tiefseekabeln legt nahe, dass die darin während geomagnetischer Stürme induzierte Spannung leicht Hunderte oder gar Tausende von Volt betragen kann. Beobachtet worden sind solche Spannungsschwankungen zum Beispiel bei Transatlantik-/Transpazifikkabeln, aber auch bei kürzeren Kabeln wie zwischen Russland und Japan.

Die Telekommunikation wird nicht nur durch die GICs in den Kabeln behindert. Auch alle anderen Systeme, die durch die Ionosphäre gehende oder von der Ionosphäre reflektierte Radiowellen nutzen, reagieren empfindlich auf Weltraumwettereffekte. Grund dafür ist, dass es während Weltraumwetterstürmen zu dramatischen Änderungen der Eigenschaften der Ionosphäre kommt. Signale zwischen Erdoberfläche und Satelliten können abgeschwächt oder gestört werden und die normale Funktion beeinträchtigen.

*Beispiel:* An einem Tag im Jahre 1996, also nicht während eines Maximums der solaren Aktivität, wurden die Ausfälle eines Mobilfunktelefonnetzes in einem grossen US-Bundesstaat aufgezeichnet: Die ostwärts gerichteten Antennen registrierten im Vergleich zu den west- und nordwärts gerichteten Antennen während des Sonnenaufgangs eine vier Mal höhere Ausfallrate. Der Grund: Ein Flare auf der Sonne.

## 2.6 Risiken in der Stromversorgung

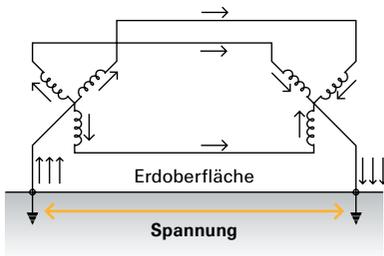


Abbildung 13  
Problem für die Stromversorgung: Die Spannung zwischen den Erdungspunkten von zwei Transformatoren verursacht geomagnetisch induzierte Ströme (GIC). Diese fließen durch die dreiphasigen Transformatoren zu den Stromkabeln der Hochspannungsleitungen, was zur Sättigung der Transformatoren, zur Überhitzung und im Extremfall zur Zerstörung führen kann.

Eine Veränderung des geomagnetischen Feldes induziert während einer magnetischen Störung oder eines Sturms ein geoelektrisches Feld, was zu Spannungsunterschieden zwischen den Erdungspunkten bei Transformatoren führt. Wie Abbildung 13 zeigt, leiten diese Spannungsunterschiede die geomagnetisch induzierten Ströme durch die Transformatoren und entlang der Hochspannungsleitungen. In einem dreiphasigen Energiesystem verteilen sich die GICs gleichmässig unter die Phasen. GICs führen zur Sättigung von Transformatoren: Ein normalerweise mit einem sehr kleinen Anregungsstrom arbeitender Transformator erfährt einen viel stärkeren Strom und arbeitet somit ausserhalb seines vorgegebenen Grenzbereichs.<sup>6</sup> Die Konsequenzen hängen stark vom Transformatortyp ab, können aber bis hin zu Abschaltungen führen.

Die Stärke der GICs in Energieversorgungssystemen während eines geomagnetischen Sturms hängt ab vom geoelektrischen Feld, das durch das ionosphärisch-magnetosphärische Stromsystem vorgegeben wird, von der Struktur der Erdleitfähigkeit und von der Distanz zwischen zwei Erdungspunkten von Stromversorgungsleitungen. Mit Computermodellen können die Bereiche in einem Energieversorgungssystem berechnet werden, die am wahrscheinlichsten auf GICs reagieren. Im allgemeinen erleiden jene Transformatoren den grössten Schaden durch GICs, die sich an den Ecken eines Energieversorgungssystems befinden (Abbildung 14).

Abb. 14  
Die orangen Linien markieren Richtung und Stärke des geoelektrischen Feldes, welches die grössten GICs bei verschiedenen Transformatoren innerhalb des finnischen 400 kV-Stromversorgungsnetzes (punktirierte Linien) verursachen. Bemerkenswert sind die grossen GIC-Werte an den Ecken des Netzes.



Ein gesättigter Transformator führt grosse Blindstromanteile, deren Menge proportional zur Stärke des GIC's ist. Ein erhöhter Blindstromanteil verringert die Übertragungsfähigkeit des Systems; die Spannung verringert sich tendenziell. Besonders, wenn vom System Leistung gefordert wird, kann es zu Spannungsausfällen im System und schliesslich zum völligen Blackout kommen. Die Rückkehr zu normalen Bedingungen kann einige Stunden erfordern; dies war im März 1989 in Québec der Fall. Ein gesättigter Transformator erzeugt viele harmonische Schwingungen in Strom und Spannung, wodurch die Wellenformen gestört und nicht mehr reine 50 oder 60 Hz-Schwingungen sind. Solche Phänomene können zu falschen Relaisstellungen der Schutzgeräte und dadurch zu Verlusten führen. Der magnetische Fluss steigt in einem gesättigten Transformator auf Werte an, für die er nicht konstruiert ist. Im schlechtesten Fall kann es deshalb zu einem Feuer kommen, das den Transformator zerstört.

Theoretisch kann der Fluss von GICs in Hochspannungs- oder in Erdungsleitungen von Transformatoren durch die Nutzung von in Reihe geschalteten Kondensatoren blockiert werden. Nach dem Ereignis vom März 1989 hat man bei den Hydro-Québec-Kraftwerken verschiedene Kondensatoren in Serie installiert. Diese Lösung ist jedoch teuer und technisch nicht einfach. Zudem schliesst die Verwendung von in Reihe geschalteten Kondensatoren nicht aus, dass in anderen Leitungen die GICs stärker werden können.

Wird ein Elektrizitätsversorger vor einem sich nähernden geomagnetischen Sturm gewarnt, kann er verschiedene Massnahmen treffen: Von der Lastenreduzierung des Systems über das Prüfen des einwandfreien Funktionierens der in Reihe geschalteten Kondensatoren bis zum Abschalten von Systemkomponenten. Alle diese Aktionen sind kostenaufwändig. Deshalb dürfen keine falschen/irreführenden Vorhersagen gemacht werden.

## **2.7 Risiken für die Gas- und Ölindustrie**

Gas- und Ölpipelines neigen an jenen Punkten zur Korrosion, wo elektrischer Strom vom Metall in die umgebende Erde fliesst. Korrosion ist ein elektrochemischer Prozess, der vor allem an der Oberfläche einer Pipeline auftritt. Deshalb sind Pipelines mit einem Korrosionsanstrich versehen und mit Isolationsmaterial umhüllt. Da aber dieser Schutz nicht perfekt ist, sind Pipelines mit einem kathodischen Schutzsystem ausgerüstet. Dieses hält die Pipelines in einem negativen Potential von ungefähr einem Volt bezüglich des Erdbodens – eine Schutzspannung, die dauernd aufrecht erhalten bleiben muss.

Ein wirksamer kathodischer Schutz hängt auch vom Widerstand des umgebenden Bodens ab. Das geoelektrische Feld, das durch magnetische Störungen verursacht wird, führt zu geomagnetisch induzierten Strömen in Pipelines und produziert zusätzliche Spannungen zwischen Pipeline und Erde. Die Spannungsdifferenz zwischen Pipeline und Boden kann die Schutzspannung leicht übersteigen. Dann ist der Korrosionsschutz nicht mehr gegeben (Abbildung 15).

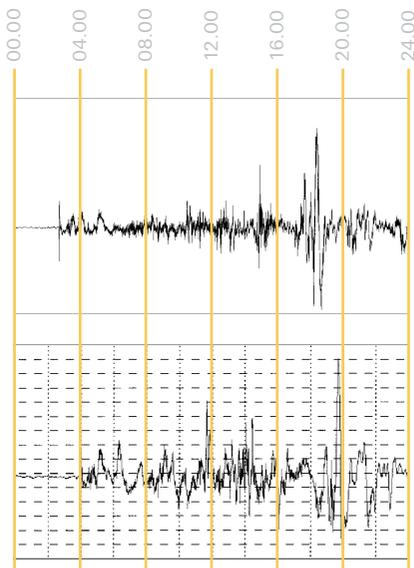


Abbildung 15

Ein Beispiel für eine in zwei Ländern gleichzeitig (zwei Stunden Zeitunterschied wegen Verwendung unterschiedlicher Zeitangaben, GMT bzw. MEZ) aufgetretene Spannungsdifferenz zwischen Pipelines und Erdboden: Am 18.2.1999 wirkte ein magnetischer Sturm in Finnland (untere Abbildung mit Magnetfeld-daten) und in Hessen, Deutschland (obere Abbildung, Ruhrgas Potentialmessung), auf die Pipelines. Auswirkungen auf Pipelines zeigen sich also nicht nur in Skandinavien, sondern bis weit nach Mitteleuropa hinein. Polarlichter wurden zur selben Zeit in Finnland beobachtet.

Heute haben die Isolationsmaterialien eine höhere elektrische Widerstandsfähigkeit als ältere Produkte. Dies führt zu einem grösseren Spannungsunterschied zwischen Pipeline und Erdboden. Dadurch steigt das Korrosionsrisiko an jenen Stellen der Pipeline, wo die Isolation defekt ist. Wie stark die durch das Weltraumwetter bedingte Spannungsdifferenz zwischen Pipeline und Erdboden tatsächlich zu einem Anstieg der Korrosionsrate in Pipelines führt, ist eine noch unbeantwortete Frage. Unbestritten ist jedoch das erhöhte Korrosionsrisiko von Pipelines in hohen geographischen Breiten.

Ähnlich wie bei einem Energieübertragungssystem hängen Stärke der GICs entlang einer Pipeline und Spannungsunterschiede zwischen Pipeline und Erdboden von zwei Dingen ab: von der geophysikalischen Situation und den Details des Pipeline-Netzwerks.<sup>7</sup> Modellberechnungen, die durch Messungen und Beobachtungen geomagnetischer Veränderungen gestützt wurden, dienen dazu, die am meisten betroffenen Regionen eines Pipelinetzwerkes zu bestimmen. Im allgemeinen sind die Spannungsdifferenzen zwischen Pipeline und Erdboden an den Inhomogenitäten des Systems am grössten: an den Enden, den Bögen und den Verzweigungen der Pipeline. Aber auch Änderungen des Materials oder des Rohrdurchmessers fördern Spannungsdifferenzen. Veränderungen der Leitfähigkeit der Erde sind in diesem Sinne auch Inhomogenitäten, deren Auswirkungen sich normalerweise über einige zehn Kilometer erstrecken können. Erfahrungen zeigen, dass bei langen Pipelines geomagnetisch induzierte Spannungen grösser sind als bei kurzen. Deshalb werden lange Pipelineabschnitte manchmal durch Isolationsflansche elektrisch getrennt. Dieses Vorgehen verringert die auftretenden Spannungen tatsächlich, lässt aber gleichzeitig die Zahl der Inhomogenitäten ansteigen. Deshalb sind alle Auswirkungen als Folge der eingebauten Isolationsflansche sorgfältig zu analysieren.

Die Weltraumwetterrisiken von Pipelines sind nicht so gut untersucht wie jene für Energieübertragungssysteme. Neuere Methoden verwenden jedoch bereits bessere Modellberechnungen, und Fortschritte verspricht man sich auch aus einer in Kürze erscheinenden internationalen Studie «Pipeline-GIC», bei der unter Führung der Geological Survey of Canada acht Firmen über vier Jahre mitwirkten.

## 2.8 Risiken für die Eisenbahn

GICs können Störungen in den Signalsystemen verursachen. Solche Fehlfunktionen sind zum Beispiel 1982 in Schweden vorgekommen, als Eisenbahnsignale ohne sichtbare äussere Einflüsse nicht richtig schalteten. Auch nach dem schweren Zugsunglück in Norwegen im Januar 2000, bei dem 19 Menschen starben, kam vorerst die Vermutung auf, das verhängnisvolle Schalten des Signals auf «freie Fahrt» sei Folge erhöhter Sonnenaktivität gewesen. Dies hat sich allerdings nicht bewahrheitet. Die Modelle zur Wechselwirkung zwischen geomagnetischen Stürmen und Eisenbahnsystemen sowie die Auswirkungen der GICs auf Eisenbahnausrüstungen sind jedoch bisher nicht abschliessend erforscht.

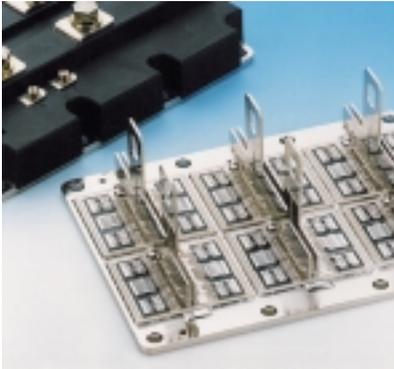


Abbildung 16  
Halbleiterbauelemente des ICE, die durch  
Teilchenschauer der kosmischen Strahlung  
zerstört werden.

Auch die kosmische Strahlung kann sich negativ auf den Bahnverkehr auswirken. Als anfangs der neunziger Jahre der deutsche Hochgeschwindigkeitszug ICE in Betrieb genommen wurde, zeigten sich schon bald Leistungsverluste im Antrieb. Die betroffenen elektronischen Bauteile wurden quasi durch «Kurzschluss» zerstört (Abbildung 15). Dies kam unregelmässig vor, jedoch nie während Fahrten in Tunnels. Ursache der Kurzschlüsse waren Teilchen aus dem Schauer der kosmischen Strahlung: Sie stossen mit jenen des Halbleiters zusammen und geben Energie ab. Im starken elektrischen Feld der Geräte, welche die Leistung des Zuges bestimmen, kann eine Vervielfachung des Feldes erfolgen. Beim ICE kann es unter ungünstigen Umständen zu einer vollständigen Zerstörung der betroffenen Bauteile kommen.

Die Auswechslung der gefährdeten Teile ist aufwändig, und man schätzt, dass heute noch etwa die Hälfte der ICE-Züge mit solchen Teilen ausgerüstet ist. Abzuwarten bleibt, wie die Antriebstechnik in der neusten Generation des Hochgeschwindigkeitszugs auf das Weltraumwetter reagiert – Massnahmen zum besseren Schutz der Bauteile sind getroffen worden.

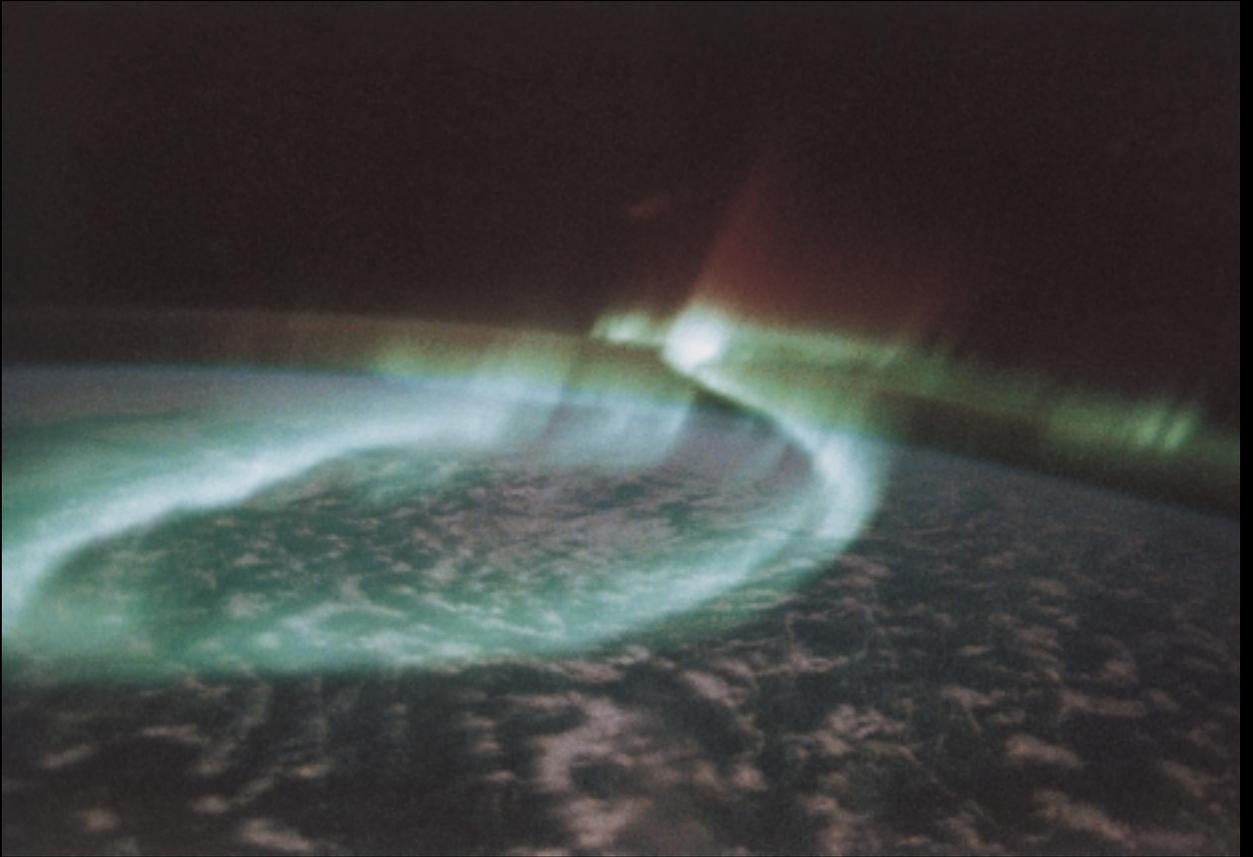


Abbildung 17  
Ein vom Weltraum aus aufgenommenes  
Polarlicht über der Erde.

### 3 Weltraumwetterprognosen

Weltraumwetterprognosen sind nur möglich, wenn die gesamte Kette von physikalischen Phänomenen berücksichtigt wird. Letztere sind im Kapitel «Grundlagen zum Weltraumwetter» dargelegt und in Abbildung 18 schematisch zusammengefasst.

Die Komplexität dieser Kette und ihrer einzelnen Glieder lässt erahnen, dass Weltraumwetterprognosen äusserst schwierig sind. Ein oft praktiziertes Vorgehen ist, nur für bestimmte Teile dieser Kette Prognosen zu erstellen, zum Beispiel geomagnetische Stürme vorauszusagen. Besser wäre natürlich, man könnte die Stärke der GICs durch geomagnetische Stürme für die verschiedenen Teile eines Energieversorgungssystems prognostizieren. Dies ist jedoch praktisch noch nicht möglich, weil die Vorhersage von geomagnetischen Stürmen stark von den Beobachtungsmöglichkeiten der Sonne und von Satellitenmessungen im erdnahen Weltraum abhängig ist.

Vereinfacht lässt sich sagen, dass die Qualität der heutigen Weltraumwetterprognosen mit jener der atmosphärischen Wettervorhersagen vor ungefähr 50 Jahren vergleichbar ist. Doch: Wenn vor 50 Jahren Stürme schlecht vorausgesagt wurden und die Vorbereitung darauf ungenügend war, waren die finanziellen Folgen kleiner im Vergleich zu den finanziellen Risiken, welche die unzureichende Berücksichtigung des Weltraumwetters heute in sich birgt.

Als Basis für lang- und kurzfristige Vorhersagen («Forecast») dienen «Aftercast» und «Nowcast». «Aftercast» beschreibt beim Weltraumwetter den gegenwärtig am häufigsten praktizierten Vorgang: Einzelne Ereignisse werden im Nachhinein analysiert, zum Beispiel bezüglich Ausbreitung und Auswirkung. Das folgende Beispiel vom April 1997 illustriert die heutigen Möglichkeiten von «Aftercast» anhand einer Analyse der Ausbreitung eines Weltraumwetterereignisses solaren Ursprungs bis zur Ionosphäre.

#### *Das Ereignis vom 7. bis 10. April 1997*

Für dieses Ereignis liegen viele Beobachtungen vor.<sup>8</sup> Die GPS-Satelliten und deren weltweit verteilte Bodenstationen ermöglichten die genaue Verfolgung der Entwicklung des Zustandes der Ionosphäre: Fast den ganzen 10. April zeigte die Ionosphäre über Europa ein normales Verhalten. Doch in den Abendstunden kam es innerhalb von wenigen Stunden zu einem mehr als hundertprozentigen Anstieg des Elektroneninhalts der Ionosphäre.<sup>8</sup> Der Satellit SAMPEX nahm ein beeindruckendes Bild der Verteilung der Elektronen über der gesamten Nordhalbkugel der Erde auf (Abbildung 19).

Insbesondere in Nordamerika konnten am Abend des 10. April wunderschöne Polarlichter gesehen werden. Etwa um 16.45 Uhr GMT war die Magnetosphäre der Erde von einem CME getroffen worden, der seinen Ursprung drei Tage zuvor auf der Sonne hatte. Durch Radiobeobachtungen der Sonne und des interplanetaren Raumes konnte die Ausbreitungsgeschwindigkeit der mit dem CME verbundenen Stosswelle genau bestimmt werden. Sie betrug in der Sonnenkorona 670 km/s und im interplanetaren Raum etwas mehr als 600 km/s.

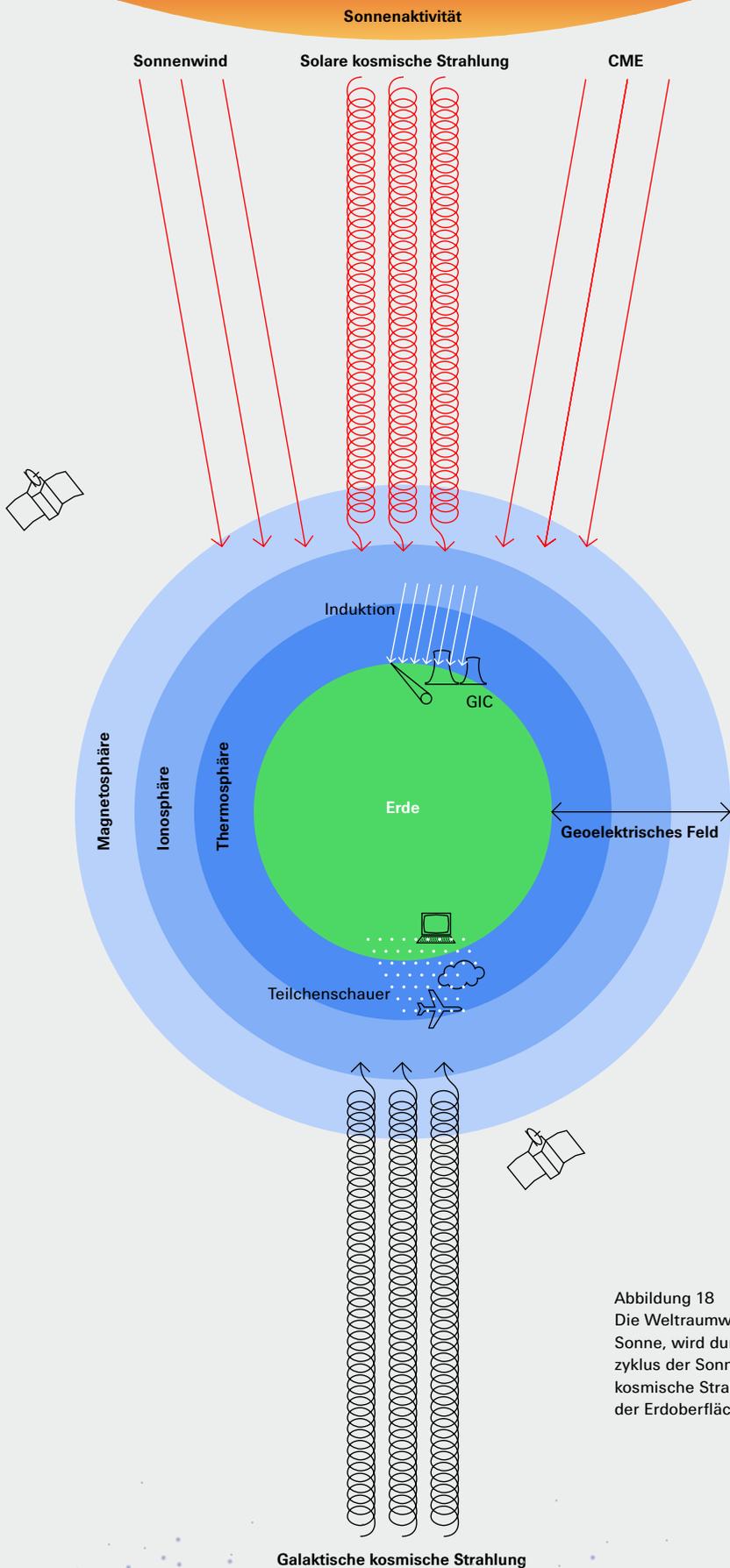


Abbildung 18  
 Die Weltraumwetterkette beginnt an der Sonne, wird durch den elfjährigen Aktivitätszyklus der Sonne sowie die galaktische kosmische Strahlung bestimmt und endet an der Erdoberfläche.

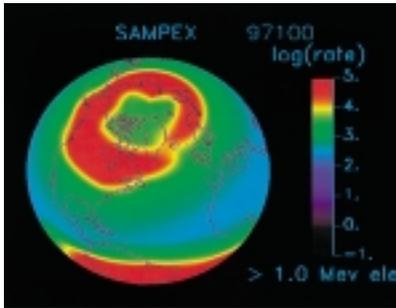


Abbildung 19  
Die Verteilung hochenergetischer Elektronen (mehr als eine Million Elektronenvolt Energie) aus der magnetischen Wolke vom 10. April 1997. Nördlich des Polarkreises wurde über den Regionen des Nordatlantiks und von Nordamerika, Skandinavien und Sibirien erhöhte Elektronenkonzentrationen gemessen.

Das geschilderte Ereignis ist ein Beispiel für die gegenwärtigen technischen Möglichkeiten im Bereich der Weltraumwetterprognosen. Wichtig ist: Aftercast ist wenig problematisch, obwohl Ereignisse auf der Sonne und Weltraumwettererscheinungen auf der Erde nicht immer direkt korrelieren. «Aftercast»-Analysen helfen, die komplizierten physikalischen Prozesse zu verstehen. Aus einer Vielzahl solcher Analysen hat das amerikanische Zentrum für Fragen des Weltraumwetters in Boulder 1999 die Skalen zur Stärke des Weltraumwetters in drei Kategorien 1) Solare Strahlungsströme, 2) Radio Blackouts und 3) Geomagnetische Stürme eingeteilt und für jede dieser drei Kategorien fünf Stufen von extrem stark bis schwach bestimmt. Diese Skalen wiederum sind über messbare physikalische Größen wie Stärke der solaren Teilchenflüsse oder Stärke der solaren Röntgenstrahlung definiert. Zudem konnten mit diesen Skalen verschiedene Effekte wie die Kontrolle von Satelliten und die Auswirkungen auf Energieübertragungssysteme, auf die Radiowellenausbreitung sowie auf Astronauten kategorisiert werden.

Nowcast beschreibt den Vorgang, beim Weltraumwetter quasi on-line – also in Echtzeit – die Ausbreitung von Ereignissen zu verfolgen. Die Erfassung von Weltraumwettereffekten in Echtzeit wird heute international stark vorangetrieben – im Interesse der Forschungsinstitute und der Industrie. So ist es zum Beispiel wichtig, das Verhalten eines geomagnetischen Feldes oder von GICs in einem Transformator in Echtzeit erfassen zu können. Nowcast ermöglichen es, technische Systeme sorgfältig zu beobachten, wenn Besonderheiten zu erwarten sind. Dadurch sollte zu spätes Reagieren vermieden und auf zu erwartende Probleme adäquat reagiert werden können.

Tatsächliche «Forecast», kurz- und langfristige Vorhersagen, können nur durch das Zusammenführen von lückenlosen Beobachtungsmöglichkeiten und der Modelle aus den Bereichen a) Sonne/Heliosphäre, b) Magnetosphäre und c) Ionosphäre/Thermosphäre erfolgreich sein. Operationell anwendbare Modelle für alle drei Bereiche werden gegenwärtig parallel entwickelt. Ein Modell aus dem Bereich Magnetosphäre zum Beispiel könnte das Kernmodell einer alle drei Bereiche umfassenden Vorhersage sein und mit Modellen aus den Bereichen Ionosphäre und Thermosphäre verbunden werden. Mit den gegenwärtig zur Verfügung stehenden Computern sind aber die magnetosphärisch-ionosphärischen Simulationen noch zu langsam, um sie in der Praxis anwenden zu können. Kürzlich entwickelte Techniken zur GIC-Berechnung dagegen sind schnell genug. Verbesserungen in den magnetosphärisch-ionosphärischen Simulationen könnten in den kommenden Jahren zu einem Durchbruch bei der Vorhersage von GICs führen. Eventuell lassen sich solche physikalischen Simulationen künftig auch durch Methoden der künstlichen Intelligenz und neuronale Netzwerke ersetzen.

In Zukunft werden lang- und kurzfristige Vorhersagemöglichkeiten nur durch die Verbindung aller drei Modelle möglich sein. Ein erster Schritt könnten erste operationell arbeitende Vorhersagezentren sein, die in Verbindung mit vorhandenen terrestrischen und extraterrestrischen Messstationen arbeiten. Wichtig ist: Vorhersagen grosser Weltraumwetterereignisse müssen zuverlässig sein. Fehlprognosen dürfen nicht vorkommen, weil unnötig eingeleitete Vorsichtsmaßnahmen sehr teuer sind.

## 4 Weltraumwetter – was hat das mit Versicherung zu tun?

Die möglichen Konsequenzen des Weltraumwetters lassen die Risikolandschaft unserer technisierten Welt in neuem Licht erscheinen. Waren bislang Menschen und technische Systeme terrestrischen Naturgefahren ausgesetzt, zeigen sich nun mit Einbezug des Weltraums neue Dimensionen, die sich letztlich als Personen-, Sach- oder Vermögensschäden auch auf die Versicherungswirtschaft auswirken können.

GICs können die Elektrizitäts- und Telekommunikationsindustrie wie der Ice-Storm 1998 in Québec oder die Stromausfälle 1998 in Auckland (technische Ursache) und San Francisco (menschliches Fehlverhalten) treffen. Dies zeigt, dass traditionelle Versicherungsdeckungen (Risikotransfer) und neue Finanzprodukte, die reine Vermögensschäden decken (Risikofinanzierung), betroffen sein können. Zudem: Der volkswirtschaftliche Schaden bei den erwähnten Ereignissen lag weit über dem versicherten Schaden.

Wieweit beeinflusst diese Ausweitung des Blickwinkels die Versicherungswirtschaft? Die Grundidee des Versicherungsgedankens, Schäden einzelner Mitglieder einer Versichertengemeinschaft auf alle Mitglieder zu verteilen (Organisation durch Versicherer, Finanzierung durch Prämien), wird nicht in Frage gestellt. Hingegen lässt der inhomogene Charakter des Weltraumwetters Fragen bezüglich der homogenen Risikostruktur der Solidargemeinschaft aufkommen. Diese Inhomogenitäten bewirken, dass nicht alle Unternehmen in der Raum- und Luftfahrt, der Elektrizitätserzeugung und -versorgung, der Telekommunikation oder der Öl- und Gasversorgung vergleichbare Schadenwahrscheinlichkeiten und -dimensionen aufweisen. Deshalb muss das Risikoverhalten der einzelnen versicherten Unternehmen individuell beurteilt werden, damit letztlich risikoadäquate Prämien ermittelt und gefordert werden können.

Gemäss Risikodefinition sollten Tragweite und Wahrscheinlichkeit typischer Schadenereignisse bestimmt werden können. Gerade die Bemessung der Wahrscheinlichkeit stösst aber bei den Weltraumwettereffekten auf Grenzen.

In der Raumfahrt bedrohen neben Weltraumwetter und Weltraumschrott auch Kometen und Meteoriten – beispielsweise in Form der Leoniden-Meteoritenschauer<sup>9</sup> – die rund 200 kreisenden Kommunikationssatelliten. Nimmt man an, dass

- die ZHR (Zenithel Hourly Rate, Mass für die Dichte der Partikelschauer) zwischen 5000 und 150 000 beträgt,
- die Aufprallgeschwindigkeit 71 km/s misst und
- Leonidenschauer maximal 30 Minuten dauern,

beträgt die Trefferwahrscheinlichkeit für einen Kommunikationssatelliten mit 100 m<sup>2</sup> Solargeneratoren zwischen 0.006% und 2%. Bei ungünstigen Bedingungen können somit einige Satelliten getroffen werden. Die NOAA (United States National Oceanic and Atmospheric Administration) publiziert beispielsweise im Internet ([www.spaceweather.com](http://www.spaceweather.com)) Eintretenswahrscheinlichkeiten von «Solar Flares» und «Geomagnetic Storms» verschiedener Grössenklassen mit einem Zeithorizont von 24 und 48 Stunden: Am 22. Februar 2000 beispielsweise mit 1% für grosse Flares, beziehungsweise mit 30% (innert 24 Stunden) und 25% (innert 48 Stunden) für mittlere Flares.

Die Wirkung auftreffender Partikel der elektromagnetischen Strahlung, des Sonnenwindes und der solaren kosmischen Strahlung muss aber nicht immer zu einem Totalausfall eines Satelliten führen. Ein möglicher teilweiser oder eingeschränkter Betrieb ist nämlich aus Sicht des Operators und der Versicherungsindustrie individuell zu prüfen: Ein funktionsunfähiger Satellit bedeutet nicht nur ein oft mehrere Hundert Millionen Dollar teurer Sach- und Betriebsunterbrechungsschaden, sondern für den Satellitenbetreiber auch den Verlust von Kunden und Imageschäden mit gravierenden wirtschaftlichen Folgen.

Beim Umgang mit diesen Risiken sind daher – nach deren Identifikation und Analyse – die Massnahmen zur Schadensvermeidung oder -verminderung insbesondere von den Herstellern und Betreibern zu beachten. Schutzschilder gegen mechanische Gefahren und Strahlung sind zwar wegen des hohen Gewichts nur beschränkt einsetzbar. Die Trefferwahrscheinlichkeit lässt sich aber minimieren, indem die dem Partikelstrom zugewandte Querschnittsfläche des mit den weit ausladenden Solargeneratoren bestückten Satelliten verringert wird.

Bedeutend mehr Möglichkeiten der Risikominderung sind vergleichsweise in der Luftfahrt umsetzbar. Dank immer präziserer Frühwarn- oder Prognosesysteme kann beispielsweise eine angepasste Flugroutenwahl die Exposition von Mensch und Flugzeug reduzieren. Ein Vorteil gegenüber der Raumfahrt ist, dass kritische Komponenten ersetzt werden können – Redundanzen sind in Satelliten und Flugzeugen Standard – und die Cockpit-Besatzungen in der Bewältigung gefährlicher Flugsituationen geschult und trainiert sind.

Bezüglich der Weltraumwetterrisiken zeigen sich in der Raum- und Luftfahrt grundsätzlich keine neuen Faktoren, welche nicht durch die bisherigen Versicherungsdeckungen (inkl. negativer Auswirkungen durch Langzeitexpositionen) erfasst würden. Satelliten und Flugzeuge zum Beispiel sind meist über eine All-Risk-Deckung versichert. Der Operator (Versicherungsnehmer) muss allerdings der Pflicht (Obliegenheit) einer angepassten Schadenverhütung und -verminderung nachkommen. Das heisst, die Verantwortlichen in der Raum- und Luftfahrt haben sich in angemessener Art und Weise dem Phänomen Weltraumwetter anzunehmen. Dazu zählen auch organisatorische und technische Massnahmen, welche beispielsweise die Piloten vor zu langer und intensiver kosmischer Strahlungsexposition schützen. Gerade in diesem Bereich sind die Ergebnisse der laufenden Untersuchungen besonders zu beachten.

Ein nicht zu vergessender Aspekt ist die oft angewandte Einschränkung der Versicherungsdeckung auf plötzliche und unfallmässige Ereignisse. Gelten Ereignisse wegen der immer besser werdenden Weltraumwetterprognosen nun als vorhersehbar und sind damit nicht mehr als plötzlich und unfallmässig zu betrachten? Auch Fragen nach dem zu beweisenden Kausalzusammenhang könnten künftig vermehrt zu Diskussionen führen.

Sind diese Aussagen auf die erdgebundenen technischen Systeme übertragbar? Charakteristisch für die moderne Industriegesellschaft ist, dass sich Unsicherheit nur verbreitet, wenn ein Schadenereignis Betroffenheit auslöst. Gegenwärtig sind wir in einer Phase eher grossen Vertrauens in die Technik. Dass das Funktionieren technischer Systeme nun plötzlich durch Gefahren bedroht sein soll, die von ausserhalb der Atmosphäre stammen, übersteigt das Vorstellungsvermögen oder wird

schlicht verdrängt: Noch lässt sich ruhiger schlafen im Bewusstsein, dass ein Transformator wegen eines technischen Defekts zerstört worden ist, als mit der diffusen Ahnung, dass nicht greifbare, schwer vorstellbare Weltraumwettereffekte diesen Schaden verursacht haben könnten.

Aus Sicht der Versicherungswirtschaft beziehungsweise der verschiedenen betroffenen Versicherungssparten spielen die erweiterten Ursachenketten kaum eine Rolle. Der Transformator brennt – wie zum Beispiel im März 1989 in New Jersey (vergleiche Abbildung 9) – und löst damit die Sachversicherung aus, eventuell erweitert durch eine Betriebsunterbrechungsversicherung. Ob dieser Brand durch einen Blitzschlag, ein technisches Versagen oder eben einen GIC verursacht worden ist, unterscheiden die üblichen Versicherungsbedingungen nicht.

Dieses Beispiel aus der Elektrizitätsversorgung lässt sich auch auf elektrische oder elektronische Systeme der Telekommunikation sowie auf Transportsysteme übertragen. Auch wenn korrosionsgeschädigte Pipelines zu Explosionen oder zu Umweltschäden führen, sind die Folgen meist durch entsprechende Sach-, Betriebsunterbrechungs-, Betriebs- und Produkthaftungs- oder Umwelthaftungsversicherungen gedeckt.

Underwriter sollten vermehrt den Obliegenheiten der Versicherungsnehmer bezüglich Massnahmen zur Schadenminderung Beachtung schenken. Das Mitte 2000 zu erwartende nächste Maximum der Sonnenaktivität könnte als auslösendes Moment für die Sensibilisierung zu einem risikoadäquateren Verhalten genutzt werden. Dabei ist auf die seit dem letzten Maximum vor elf Jahren grössere Vernetzung hinzuweisen, speziell im Bereich der elektrischen und elektronischen Systeme. Sowohl aus volkswirtschaftlicher wie versicherungstechnischer Sicht sind zwei risikoverschärfende Faktoren aus dieser Entwicklung zu beachten:

- a) die Zahl der störanfälligen Systeme hat stark zugenommen und kann zu einem Kumulproblem führen,
- b) die Wechselwirkungen und Abhängigkeiten können sich im Schadenfall potenzierend auswirken.

Fazit: Information und Sensibilisierung sind Aufgabe der Versicherungswirtschaft. Für die Umsetzung der risikomindernden Massnahmen sind hingegen die Versicherungsnehmer verantwortlich. Deshalb werden künftig Frühwarnsysteme, die aussergewöhnliche Sonnenaktivitäten und Weltraumwetterstürme frühzeitig und genau erfassen können, entsprechende Bedeutung erlangen. Dabei muss der Aspekt der Vorhersehbarkeit beachtet werden, denn im allgemeinen beschränken sich die Versicherungsdeckungen auf plötzliche und unfallmässige Ereignisse.

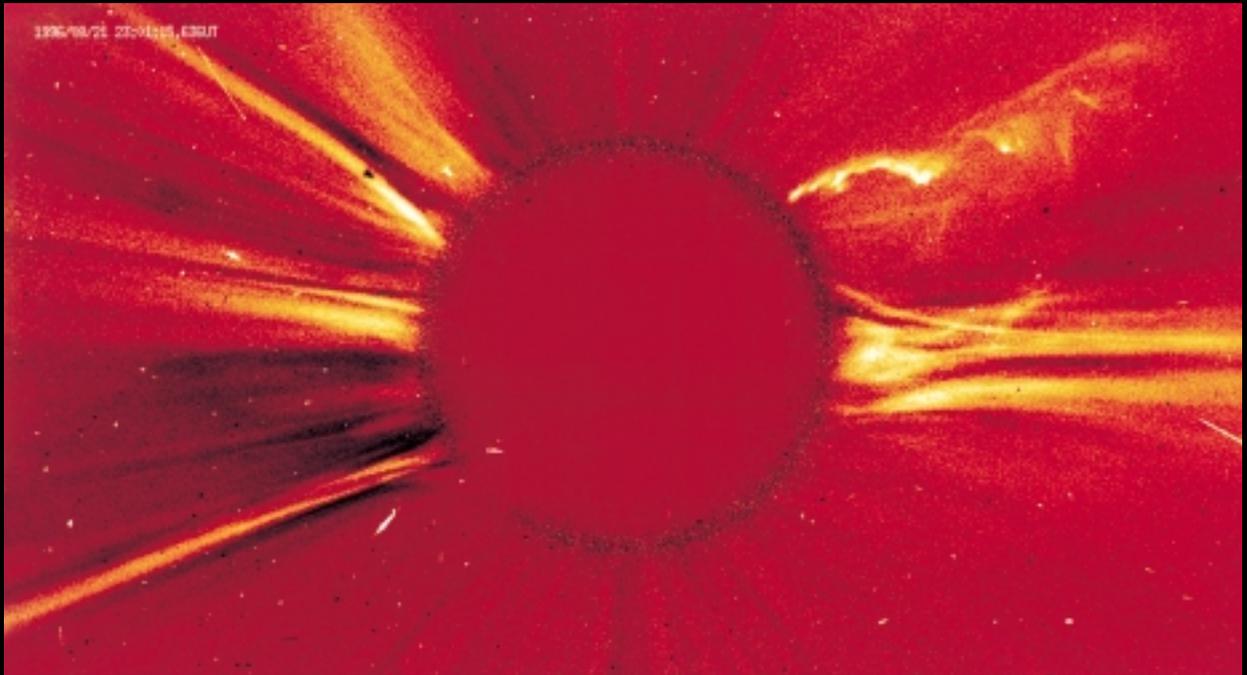


Abbildung 20  
Aufnahme der Koronaregion der Sonne, wie sie bei einer totalen Sonnenfinsternis auch von der Erde aus beobachtet wird, durch den Satelliten Soho. Viele Details sind beim sich auswärts bewegenden Gas bis in drei Millionen Kilometer Abstand von der hier verdeckten Sonnenoberfläche zu erkennen.

## 5.1 Glossar

### **Atomare Teilchen**

Mit atomaren Teilchen sind Atome gemeint. Atome bestehen aus dem Atomkern (Bestandteile: Protonen und Neutronen) und der Atomhülle (Bestandteil: Elektronen).

### **CMOS Halbleiter**

Abkürzung für Complementary Metal Oxide Semiconductor (wörtlich: komplementärer Metalloxid-Halbleiter).

### **Dielektrische Aufladungen**

Ein elektrisches Feld wird in einem elektrisch nicht leitenden Medium aufgebaut und aufrecht erhalten.

### **Dipolfeld**

Hier: Anordnung zweier gleich starker, einander entgegengesetzter magnetischer Pole (Nord- und Südpol). Beim Dauermagneten ist das Bild der magnetischen Feldlinien ein Dipolfeld.

### **Elektromagnetische Strahlung**

Wird durch zeitlich und räumlich periodische Änderungen der elektrischen oder magnetischen Feldstärke einer Welle beschrieben. Unter anderem gehören Lichtwellen, Röntgen- und Gammastrahlung dazu.

### **Flare**

Eruptionen in der Chromosphäre der Sonne (Schicht der Sonnenatmosphäre zwischen Photosphäre und Korona), wobei ein begrenztes Gebiet schnell und kurzzeitig sehr hell wird.

### **Galaktische kosmische Strahlung**

Von den Sternen der Milchstrasse (Galaxis) ausgehende Teilchenstrahlung. Die Geschwindigkeit der galaktischen kosmischen Strahlung ist annähernd Lichtgeschwindigkeit (300 000 km/s).

### **Gammastrahlung der Sonne**

Elektromagnetische Strahlung wie das Licht, aber kurzweiliger und damit energiereicher als die Röntgenstrahlung. Die Gammastrahlung ist mit blossen Auge nicht sichtbar.

### **Geomagnetisch induzierte Ströme (GICs)**

Elektrische Ströme, die in einem technischen System fliessen, zum Beispiel in einem Stromnetzwerk. GICs werden durch elektrische Felder verursacht, die als Folge der zeitlichen Änderung des geomagnetischen Feldes ins technische System induziert werden.

### **Heliosphäre**

Weltraum um die Sonne einschliesslich der Planeten. Die Heliosphären Grenze – sie befindet sich bei etwa 7500 Millionen Kilometer Entfernung von der Sonne – ist definiert durch den Bereich, in dem der Druck vom Sonnenwind und vom interstellaren Medium gleich sind.

### **Infrarotstrahlung der Sonne**

An das Rot vom visuellen Bereich sich anschliessender, langweiliger Spektralbereich des elektromagnetischen Spektrums der Sonne.

### **Ionisation**

Ionisation ist der Übergang von elektrisch neutralen Atomen in elektrisch geladene Teilchen, die Ionen. In der Astronomie spielen vor allem Ionisationszustände eine Rolle, bei denen positive Ionen entstehen (Elektronen sind von der Atomhülle abgetrennt).

### **Ionosphäre**

Obere Schicht der Erdatmosphäre, in der hauptsächlich die Ionisation von Atomen und Molekülen durch die solare Strahlung abläuft.

### **Kernfusion**

Verschmelzen von leichteren zu schwereren Atomkernen. Hauptquelle der Energieerzeugung im Innern der Sonne und der Sterne.

### **Koronaler Massenausbruch (Coronal Mass Ejection, CME)**

Über Satelliten in der Sonnenkorona (äusserste Schicht der Sonnenatmosphäre, auch Strahlenkranz der Sonne) beobachtete Auswürfe von massereichen Wolken solaren Materials in die Heliosphäre.

### **LSI-Bauelemente**

Abkürzung für Large-Scale Integration.

### **Magnetosphäre**

Äusseres Gebiet um die Erde, in dem die Materie ionisiert ist und das Erdmagnetfeld die massgebende Grösse ist.

### **Neutronen**

Teilchen ohne Ladung. Befinden sich im Atomkern, können aber auch als freie Teilchen beim Zusammenstoss von Teilchen der kosmischen Strahlung mit den Teilchen der Erdatmosphäre entstehen.

**Neutronenmonitor**

Auf der Erde aufgestelltes Gerät zum Nachweis von Neutronen.

**Photonen**

Lichtquanten. Träger von Energie und Impuls einer Lichtwelle.

**Photosphäre**

Unterste Schicht der Sonnenatmosphäre (ca. 200 km dick), aus welcher der grösste Teil des Sonnenlichts in den Weltraum gestrahlt wird. Die Photosphäre ist also der eigentlich sichtbare Teil der Sonne.

**Pionen**

Abkürzung für Pi-Mesonen. Nicht stabile Elementarteilchen, deren Masse zwischen der des Elektrons und der des Protons liegt und die in leichtere Elementarteilchen zerfallen.

**Plasma**

Gas, dessen Atome ganz oder zum Teil ionisiert sind. Das Plasma besteht also aus freien Elektronen und Ionen, weshalb in einem Plasma negative und positive Ladungen enthalten sind.

**Protuberanzen**

Ausserhalb der Photosphäre in die Sonnenkorona eingebettete Materiewolken. Protuberanzen leuchten am Sonnenrand hell gegen den dunklen Himmel.

**RAM**

Random Access Memory. Speicher mit wahlfreiem Zugriff. Die Informationen im RAM gehen nach dem Ausschalten des Computers verloren und müssen daher auf eine Festplatte oder Diskette gesichert werden.

**Röntgenstrahlung der Sonne**

Elektromagnetische Strahlung wie das Licht, aber viel kürzerwellig und damit viel energiereicher als das Licht. Die Röntgenstrahlung ist mit dem blossen Auge nicht sichtbar.

**Solare kosmische Strahlung**

Von der Sonne ständig nach allen Richtungen ausgehende Teilchenstrahlung. Die Geschwindigkeit liegt in der Größenordnung von 100 000 km/s.

**Solarkonstante**

Die gesamte von der Sonne kommende Strahlungsleistung (ca. 1,36 kW/m<sup>2</sup>), die auf der Erde auftreffen würde, wenn die Erdatmosphäre für Strahlung aller Wellenlängen völlig durchlässig wäre. Ursprünglich ging man davon aus, dass diese Strahlungsleistung konstant sei. Sie ändert sich jedoch im Laufe des elfjährigen Aktivitätszyklus der Sonne (vergleiche Abbildung 4)

**Solare Radiostrahlung**

Strahlung der Sonne im Radiofrequenzbereich (also MHz- und GHz-Frequenzen). Sie ist starken Schwankungen unterworfen. Bei Radiostrahlungsausbrüchen erfolgt ein Anstieg der solaren Radiostrahlung um das Hunderttausendfache.

**Sonnenwind**

Von der Sonne ständig nach allen Richtungen ausgehende Teilchenstrahlung. Im Sonnenwind wurden in der Bahnebene der Planeten (Ekliptik) um die Sonne Geschwindigkeiten im Bereich von wenigen 10 km/s (bei der Sonne) bis etwa 400–500 km/s gemessen.

**SRAM-Speicherchips**

Static RAM. Statischer Schreib-/Lesespeicher-Halbleiterchip.

**Thermosphäre**

Die äusserste Schicht der Atmosphäre zwischen Mesosphäre (40–80 km Höhe) und Weltraum, wo die Temperatur mit zunehmender Höhe allmählich ansteigt.

**Ultraviolettstrahlung**

Elektromagnetische Strahlung wie das Licht, aber kürzerwellig und damit energiereicher. Der Bereich der UV-Strahlung liegt zwischen dem des Lichts und dem der Röntgenstrahlung.

**Van-Allen-Gürtel**

Die Erde gürtelförmig umschliessende Zone, in der besonders viele Teilchen der kosmischen Strahlung vom Magnetfeld der Erde eingefangen und gespeichert werden.

## 5.2 Quellenhinweis

- 1) D. H. Boteler, R. Pirjola, H. Nevanlinna; 1998: The effects of geomagnetic disturbances on electrical systems at the Earth's surface, *Advances in Space Research*, 22, 1, 17–27
- 2) J. F. Ziegler et al. 1996, IBM experiments in soft fails in computer electronics (1978–1994), *IBM J. Res. Develop.* Vol. 40 No.1
- 3) H. Koskinen et al. 1999, Space Weather and Interactions with Spacecraft; SPEE Final Report, ISBN 951-697-509-7; Finnish Meteorological Institute Helsinki
- 4) D. O'Sullivan et al. 1999, Study of Radiation Fields and Dosimetry at Aviation Altitudes Final Report January 1996–June 1999, Dublin Institute for Advanced Studies
- 5) P. J. Oksanen 1998, Estimated Individual Annual Cosmic Radiation Doses for Flight Crews, *Aviation, Space and Environmental Medicine* Vol. 69 No. 7 621–625
- 6) J. G. Kappenman, V. D. Albertson; 1990: Bracing for the geomagnetic storms, *IEEE Spectrum*, March 1990, 27–33
- 7) R. Pirjola, A. Viljanen, O. Amm, A. Pulkkinen; 1999: Power and pipelines (ground systems); Proceedings of the ESA Workshop on Space Weather, ESTEC, Noordwijk, The Netherlands, November 11–13, 1998, European Space Agency, WPP-155, 45–52
- 8) G. Mann, H. Aurass, F. Jansen, B. Thomson, M. Kaiser, A. Grafe, N. Jakowski; 1999: Monitoring of shock wave propagation from the solar atmosphere to earth; Proceedings of the ESA Workshop on Space Weather, ESTEC, Noordwijk, The Netherlands, November 11–13, 1998, European Space Agency, WPP-155, 351–354
- 9) Bayerische Rück; Der Leoniden-Meteor-schauer. Ein Risiko für die Raumfahrt?, Fachreihe der Bayerischen Rück, Ausgabe 21

## 5.3 Bildnachweis

- Wir verdanken die uns zur Verfügung gestellten Bilder:
- Cover*  
B. H. Foing, ESA, European Space Agency/SOHO
- Abbildung 1*  
Kari Kaila, FIN-Oulu
- Abbildung 2*  
ESA, European Space Agency
- Abbildung 3*  
ESA/NASA/LASCO
- Abbildung 4*  
Quinn and Fröhlich, *Nature*, 401, p.841, 1999 and the VIRGO Team (SOHO)
- Abbildung 5*  
J. F. Ziegler, 1996, *IBM J. Res. Develop.* Vol. 40 No.1
- Abbildung 6*  
ESA, European Space Agency/S. Vermeer
- Abbildung 7*  
ESA, European Space Agency/ESTEC
- Abbildung 8*  
ESA/ULYSSES/SOHO
- Abbildung 9*  
J. G. Kappenman, Metatech
- Abbildung 10*  
Geological Survey of Canada, D. Boteler
- Abbildung 11*  
D. O'Sullivan, Dublin Institute for Advanced Studies, 1999
- Abbildung 12*  
NASA/LDEF
- Abbildung 13*  
R. Pirjola/Swiss Re
- Abbildung 14*  
Finnish Meteorological Institute, R. Pirjola
- Abbildung 15*  
Ruhrgas/Finnish Meteorological Institute
- Abbildung 16*  
Siemens, D-München
- Abbildung 17*  
ESA/S. Vermeer
- Abbildung 18*  
F. Jansen/R. Pirjola/Swiss Re
- Abbildung 19*  
Satellit SAMPEX
- Abbildung 20*  
ESA/SOHO

Autoren:

*Dr. Frank Jansen*, Astrophysiker,  
D-Berlin  
Diplom in Physik 1984 und Doktorarbeit in Astrophysik der kosmischen Strahlung 1993, Universität Jena.  
Bisherige Tätigkeiten als Wissenschaftler u.a. am Institut für Kosmosforschung in Berlin, im Space Science Department der ESA, NL-Noordwijk, und im Astrophysikalischen Institut Potsdam.

*Dr. Risto Pirjola*, Physiker, FIN-Helsinki  
Diplom in Mathematik 1971 und Doktorarbeit in Theoretischer Physik 1982, Universität Helsinki. Seit 1978 Wissenschaftler am Finnischen Meteorologischen Institut in Helsinki.

*Dr. René Favre*, Verfahreningenieur,  
CH-Zürich  
Studium an der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich (ETHZ), anschliessend in der chemischen Industrie in verschiedenen Projekten tätig. Seit 1988 bei Swiss Re im Risk Management Service Centre, hauptsächlich im Haftpflichtbereich.

© 2000  
Schweizerische  
Rückversicherungs-Gesellschaft  
Zürich

Titel: Space Weather –  
Gefahren aus dem Weltraum?

Autoren:  
Frank Jansen, D-Berlin  
Risto Pirjola, FIN-Helsinki  
René Favre, CH-Zürich

Herausgeber:  
Swiss Re Publishing

Redaktion/Realisation:  
RK, Corporate Communications  
Reinsurance & Risk Division

Grafische Gestaltung:  
Markus Galizinski, CH-Zürich

Bildnachweis:  
Siehe Seite 39

Zusätzliche Exemplare sowie  
eine Übersicht der Swiss Re-Publikationen (Swiss Re Publishing –  
Our expertise for your benefit)  
können bestellt werden bei:

Swiss Re  
Mythenquai 50/60  
CH-8022 Zürich  
Telefon +41 1 285 21 21  
Telefax + 41 1 285 20 23  
E-mail publications@swissre.com

Bestell-Nr. 203\_00223\_de

R&R, 4/00, 4000 de