

Sonnenwetter-Fachbegriffe

Sonnenfleckenrelativzahl, R

Vom Direktor des damaligen Zürcher Sonnenobservatoriums Johann Rudolf Wolf im Jahre 1849 eingeführte Methode, um die Aktivität der Sonnenflecken auf einer für alle Beobachter gemeinsamen Grundlage zu beschreiben.

$$R = k(10g + f)$$

Hierin bedeuten:

- R = Sonnenfleckenrelativzahl;
- k = Korrekturfaktor für die optische Ausrüstung;
- g = Anzahl der → Regionen;
- f = Anzahl der individuellen Flecken.

Die mit dem Faktor 10 multiplizierte Zahl g führt zu einer Wichtung der Regionen und stellt das besondere Verdienst Wolfs dar. Er hatte damals bereits erkannt, daß die Regionen eine weitaus größere Bedeutung haben als die im allgemeinen kleineren individuellen Flecken. Die R eines einzelnen Sonnenflecks beträgt demnach $k(10+1) = k11 \sim 11$. Große Regionen können z. B. 80 und mehr individuelle Flecken enthalten.

Leider schwankt R sowohl im Rahmen der Beobachtungslage (z. B. eignet sich die Wüste besser als das oft bewölkte Mitteleuropa) als auch mit der Sensitivität der Ausrüstung. Den höchsten Wert von R beobachtet die solar-terrestrische Weltzentrale in Boulder/Colorado (Space Environment Center/SEC). International liegt R etwa bei $2/3R_{\text{Boulder}}$. R schwankt oft drastisch von Tag zu Tag. Das internationale Monatsmittel R_i beruhigt diese Kurve. Weitere statistische "Ausreißer" werden mit der zwölfmonatigen R_{12} geglättet.

Beispiel: Gegenwärtiger 23. Elfjahreszyklus:
 Höchste R: 401 am 20. Juli 2000;
 höchste R_i : 169,1 im Juli 2000;
 höchste R_{12} und damit Zyklusmaximum: 120,8 im April 2000.

Flux

Das Wort Flux ist ein Kürzel und bezeichnet die Radiostrahlung der Sonne. Die Angabe der Fluxindizes (SRI) auf der international vereinbarten Wellenlänge von 10,7 cm (2800 MHz), gemessen in 10^{-22} Watt pro Quadratmeter und pro Hertz Bandbreite ($W^{22}m^{-2}Hz^{-1}$) ist als Indikator für die Aktivität der Sonne weitaus verlässlicher als die oft sprunghafte Sonnenfleckenrelativzahl. Ein Flux von 150 Fluxeinheiten (fu) bedeutet demnach eine Strahlungsleistung von $150 \cdot 10^{-22}$ Watt, die pro Sekunde auf eine Fläche von einem Quadratmeter auftrifft. Die Fluxwerte werden täglich vom Observatorium Pen-ticton/British Columbia im Nordwesten Kanadas gemessen. Je höher der Flux, desto höher die Sonnenaktivität. Daraus leitet sich eine probate Regel für den Kurzwellenfunk ab: Je höher der Flux, desto besser die Ausbreitungsbedingungen. Da der Flux im Gegensatz zum Licht um den Sonnenrand herumwandert, dient er u. a. zur Vorhersage sogenannter aktiver Längengrade - aktiver Sonnenregionen -, die sich noch auf der Rückseite der Sonne befinden, bald aber am Ostrand erscheinen.

Region

Eine Gruppe von Sonnenflecken mit vierstelliger Numerierung (z. B. Region 9957), registriert vom SEC Boulder. Regionen, die nach etwa 27 Tagen (synodische Rotationsdauer der Sonne) wiederkehren, erhalten jeweils neue Zahlen. Wird die Zahl 9999 erreicht, beginnt eine neue Zählung mit 0000, 0001 usw., z. Zt. gekürzt: 195 anstelle von 0195.

Regionen und Flecken (z. B.) sind der differentiellen Rotation unterworfen. Auf dem Äquator kehren sie (von der Erde aus betrachtet) nach etwa 25,4 Tagen zurück. Mit steigender heliografischer Breite wächst die Rotationsdauer und erreicht am Pol etwa 34 Tage.

Mögel-Dellinger-Effekt (MDE)

Der auch mit Shortwave Fade (SWF) bzw. Sudden Ionospheric Disturbance (SID) bezeichnete M. löscht mit steigender Intensität immer höhere Frequenzen, sogar bis etwa 300 MHz (UKW), auf Funkstrecken aus, die über die Tagseite der Erde laufen; am stärksten im geografischen Bereich um den lokalen Mittag. Er wird von energetischen Eruptionen (→ Flare) auf der Sonne hervorgerufen und beginnt bei hohen C-Klasse-Flares. Schon in der mittleren M-Klasse kann der Ausfall total sein. Bei X-Klasse-Flares tritt immer Totalausfall auf. Die Ursache des M. ist eine plötzliche intensive Strahlung im extremen Ultraviolett (UV), vor allem aber Röntgenstrahlung, die auf der Erde bis in die tiefstgelegene, dichteste ionosphärische Schicht, die D-Schicht, in Höhen zwischen etwa 60 und 90 km, vordringen kann und dort auf Grund ihrer hohen Energie weitaus mehr neutrale Luftmoleküle in Ionen und freie Elektronen trennt als das normale UV-Tageslicht.

Gedankenversuch: Eine Welle trifft auf einen Gartenzaun. Je länger die Welle, desto höher die Zahl ihrer Kollisionen mit den Pfählen und desto größer folglich ihr Energieverlust. Daher werden die langwelligeren Bänder (z. B. 49 m) eher ausgelöscht als die höheren (z. B. 13 m).

Man nennt den M. auch "Tote Viertelstunde" - denn so lange dauern oft die ihn verursachenden Eruptionen. Manchmal dehnt sich dieser Vorgang jedoch über Stunden aus. Intensive Flareaktivität im Zusammenhang mit hoher Röntgen-Hintergrundstrahlung auf der Sonne führt zu anhaltender anomaler Dämpfung, die sich als (im allgemeinen kleinerer) Dauer-M. auswirkt.

Umgekehrt verleiht der M. der D-Schicht die Fähigkeit, Längst- bzw. Langwellen zur Erde zurückzulenken. Die Signale werden stärker (SES - Sudden Enhancement of Signal). Die Überlagerung der Raumwelle mit der Bodenwelle führt zur Phasenanomalie (SPA - Sudden Phase Anomaly). Der M. unterdrückt die kosmische Hintergrundstrahlung (SCNA - Sudden Cosmic Noise Absorption).

(Die hohe Luftdichte der D-Schicht zwingt die freien Elektronen zur raschen Rekombination mit den Ionen zurück neutralen Moleküle. Daher kann die D-Schicht Mittel- und Kurzwellen nicht zur Erde reflektieren. Sie dämpft die Wellen nur.)

Die Übereinstimmung von optischen Flarebeobachtungen auf der Sonne (im weißen, besonders aber im H-Alpha-Licht - der ersten Ionisationsstufe des Wasserstoffs bei einer Wellenlänge von 656,3 nm) und M. beweist, daß

1. die Quelle auf der Sonne liegt und
2. es sich um elektromagnetische Strahlung handelt, die sich mit Lichtgeschwindigkeit ausbreitet.

Der M. wurde von Hans Mögel schon Ende der 20er Jahre bei Transradio Nauen (DEBEG) beobachtet und am 12.09.1930 in einem Vortrag der Deutschen Geophysikalischen Gesellschaft beschrieben. Mögel hatte erkannt, daß zu Beginn eines M. eine geringe magnetische Störung der Horizontalkomponente H des Erdmagnetfelds (Baystörung) auftritt. (Diese läßt immer auf ein hochatmosphärisches Stromsystem schließen.) Von Mögel inspiriert hat der Amerikaner J. H. Dellinger dann diese sogenannte Kurzstörung im Jahre 1935 dem National Bureau of Standards vorgestellt.

Bild 1 zeigt das Ionogramm des Juliusruher Ionosphärenobservatoriums (Insel Rügen) während eines M.: Die D-Schicht hat die Signale total absorbiert.

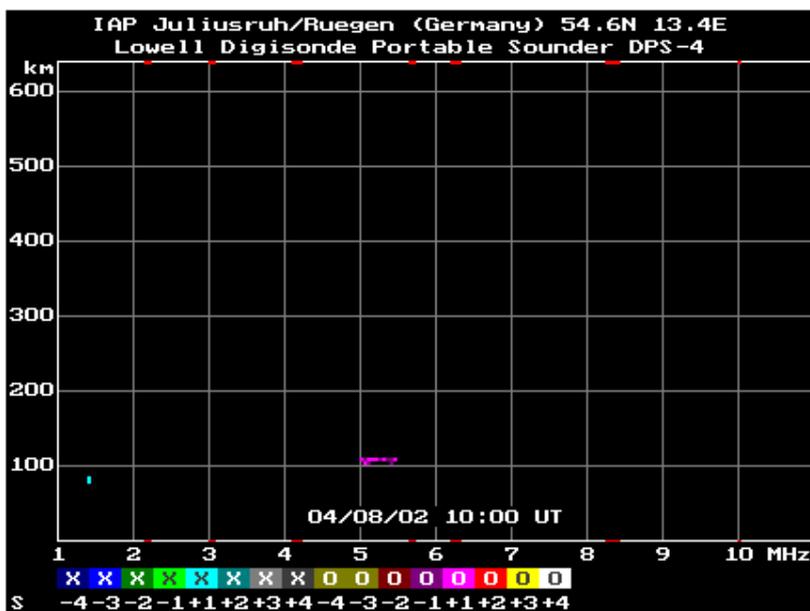


Bild 1. Mögel-Dellinger-Effekt. Die Signale werden von der D-Schicht absorbiert.

Polkappenabsorption (PCA)

Die P. ist prinzipiell mit dem → MDE vergleichbar. Sie absorbiert Kurzwellen und UKW bis etwa 300 MHz, reflektiert aber Lang- und Längswellen zwischen 3 und 300 kHz innerhalb der Polkappe der Erde jenseits von etwa 70° Nord und Süd. Auch sie wird von energetischen Eruptionen (→ Flare) auf der Sonne hervorgerufen. Bei der P. sind aber nicht das extreme Ultraviolett und die Röntgenstrahlung sondern schnelle relativistische Protonen mit Energien >10 MeV die Ursache, die vom bipolaren Erdmagnetfeld auf die Polkappe gelenkt werden und die D-Schicht in Höhen zwischen etwa 55 und 90 km ungewöhnlich stark ionisieren. (Der Autor hat die P. auch schon bei Protonen mit kleineren Massen <2 MeV beobachtet.) KW-Strecken werden extrem gedämpft oder ausgelöscht (z. B. WWVH, Hawaii, auf 15 MHz in Deutschland bzw. Europa; diese Strecke läuft nur wenige Grad am Pol vorbei). Die Dauer der P. ist jedoch weitaus größer als beim MDE. Sie beträgt bis zu mehreren Tagen. Die P. dämpft die kosmische Hintergrundstrahlung. Auf der international vereinbarten Frequenz von 30 MHz wurde die (untere) Ereignisschwelle so festgelegt: 2 dB bei Tag und 0,5 dB bei Nacht.

Flare

Flares sind Eruptionen bzw. Explosionen auf der Sonne; ihr Ursprung liegt im allgemeinen in größeren magnetisch komplexen Regionen (mit einer bzw. mehreren magnetischen → Delta-Konfigurationen). Einen Hinweis auf einen nahenden Ausbruch geben meist eng gebundene, verdrillte Felder. Das F. beginnt gewöhnlich mit einem Röntgenblitz, dem (wie das Aufblähen und Aufplatzen einer Puddingblase im Topf) der Ausstoß einer Teilchenwolke (95 % Protonen und die etwa zweitausendfach "leichteren" Elektronen) ins All folgt. Verteilt sich dieser Schwarm und strahlt als Teil- bzw. Vollhalo, rund um die Sonnenscheibe, seine Partikeln ins All, spricht man von einem → Koronalen Massenauswurf

Die ersten Effekte eines Flares auf der Erde sind: → Mögel-Dellinger-Effekt nach reichlich acht Minuten; und → Polkappenabsorption nach 12 Minuten bis zu einigen Stunden.

Flares werden nach ihrer Stärke (Röntgenflux in W/m^2 bei einer Wellenlänge zwischen 0,1 und 0,8 nm) klassifiziert:

- A-Klasse $< 10^{-7} W/m^2$ (sogenannter ruhiger Röntgen-Hintergrund)
- B-Klasse 10^{-7} bis $10^{-6} W/m^2$
- C-Klasse 10^{-6} bis $10^{-5} W/m^2$
- M-Klasse 10^{-5} bis $10^{-4} W/m^2$
- X-Klasse 10^{-4} bis $10^{-3} W/m^2$
- Y-Klasse 10^{-3} bis $10^{-2} W/m^2$

Beispiel: Ein M2,1-Flare entspricht einem Röntgenflux von $2,1 \times 10^{-5} W/m^2$.

Koronaler Massenauswurf

Koronale Massenauswürfe (Coronal Mass Ejection - CME) sind im extremen Ultraviolett gut erkennbare Wolken bzw. Blasen aus heißem Plasma, die sich durch den interplanetaren Raum mit hoher Geschwindigkeit als Stoßwelle von der Sonne fortbewegen. K. können Flares von der kleinen C-Klasse aufwärts bis zur Y-Klasse begleiten. (Wenn auch in ihrer übergroßen Mehrzahl, so sind K. nicht an Flares gebunden.) Je intensiver das Flare, desto umfassender und größer der K. Bei der Explosion der Gasblase wird eine Wolke ausbrechender Teilchen (vor allem Protonen und Elektronen) vom Magnet- und Schwerfeld der Sonne zu einem sich ausdehnenden Ring (gewöhnliche Geschwindigkeit: 600 km/s, maximal 1500 km/s) um die Sonnenscheibe geformt (Vollhalo); beschränkt sich der K. nur auf Teile des Sonnenrands, spricht man von einem Semihalo bzw. Teilhalo. Beide Halos können ihren Ursprung auch jenseits des Sonnenrandes haben. K. aus dem Gebiet des Zentralmeridians der Rückseite sind selten. Ein K. mit Vollhalo erreicht gewöhnlich nach 48 Stunden die Erde und verursacht Magnet- und Ionosphärensturm, da ein Teil der Partikeln direkt über die Ekliptik läuft. Teilhalos werden nach ihrer Richtung beschrieben, mit denen sich der Hauptteil der Plasmawolke ausbreitet (z. B. südwestlich gerichtetes Teilhalo). Je steiler das Teilhalo und je entfernter der Ursprung des Teilhalos vom Zentralmeridian, desto geringer ist seine Chance, auf unsere Magnetosphäre einzuwirken und desto später auch das mögliche Eintreffen (bis zu 80 Stunden). K. werden von Koronagraphen (Bild 2), die wie der Mond bei einer Sonnenfinsternis die Sonnenscheibe verdecken (z. B. auf der Raumsonde SOHO in etwa 1,5 Millionen Kilometern Entfernung von der Erde) im extremen Ultraviolett sichtbar gemacht.

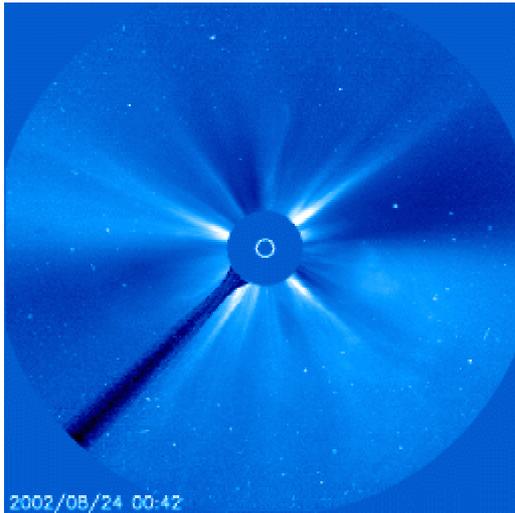


Bild 2. Koronagraph - der zentrale weiße Kreis bezeichnet die Sonne; die sie umgebende Scheibe ist der künstliche Mond; der schwarze Streifen nach links unten ist die Halterung; um die Abdeckscheibe herum entfaltet sich mit Strahlen und Flächen die Korona; die hellen Punkte sind Sterne oder Planeten.

Koronales Loch

Koronale Löcher sind große, unterkühlte Löcher in der Korona der Sonne mit geringerer Massedichte als ihre Umgebung. Im weißen Licht sind sie unsichtbar; außerhalb der Erdatmosphäre sind sie im Ultraviolett und Röntgenlicht sichtbar. (Bis zum Start der amerikanischen Venussonde Mariner 2 im Jahre 1962 mußte die Wissenschaft daher auf Entdeckung und Verständnis der K. warten, die im Jahre 1932 von Julius Bartels als nach einer Sonnenrotation von 27 Tagen wiederkehrende M-Regionen bezeichnet worden waren.) Die Magnetbindungen der K. sind weit, stehen senkrecht hoch über der Korona und laufen (ganz im Gegenteil zu den engen Bindungen aktiver Regionen, aus denen die Flares kommen) quasi bis in die Unendlichkeit hinaus. Entlang dieser Magnetlinien wandern Protonen und Elektronen schraubenförmig auswärts. Befindet sich das K. im Äquatorbereich der Sonne, wandert ein Großteil der Sonnenteilchen über die Ebene der Planeten, die Ekliptik, und überstreicht die Erde in der Form eines Tiefausläufers (einer archimedischen Spirale). Diese korotierende Interaktionszone (Corotating Interaction Region - CIR) beginnt gewöhnlich mit einem dicken Teilchenschub (>20 Protonen/cm³) bei geringer Windgeschwindigkeit (um 300 km/s). Die Weltausbreitung erlebt durch zusätzliche Ionisation (u. a.) der F-Region der Ionosphäre eine positive Phase mit steigenden Höchsten Betriebsfrequenzen (MUF - Maximum Usable Frequency). Bald aber frischt der Wind auf (allgemein 760 km/s, maximal etwa 1000 km/s), wird heißer und dünner. Die Ausbreitung verfällt; dieser Hochgeschwindigkeitswind weht (je nach Mächtigkeit des koronalen Lochs) zudem sehr böig und verursacht desto größere Schäden in der Ionosphäre, die denen aus hochenergetischen Flares durchaus entsprechen können.

Auf [Bild 3](#) erkennt man eine von einem K. mäßig gestörte sommerliche Ionosphäre über Juliusruh/Rügen mit den folgenden Schichten: E- (Höhe 100 km, bis 3,6 MHz), F1- (zwischen 200 und 350 km, bis 5 MHz) und F2-Schicht (350 bis 600 km, bis 7 MHz).

K. sind von der differentiellen Rotation (\rightarrow Regionen) aufgrund ihrer großen Höhe in der Korona abgekoppelt und folgen der Normalrotation mit einer Wiederkehr von etwa 27 Tagen. Mögliche Scherungs- und Wachstumsprozesse, Auffüllung und andere Veränderungen erschweren treffsichere Vorhersagen. Wir empfehlen daher unseren Sonnen- und Ionosphärenwetterbericht auf dieser Web-Seite.

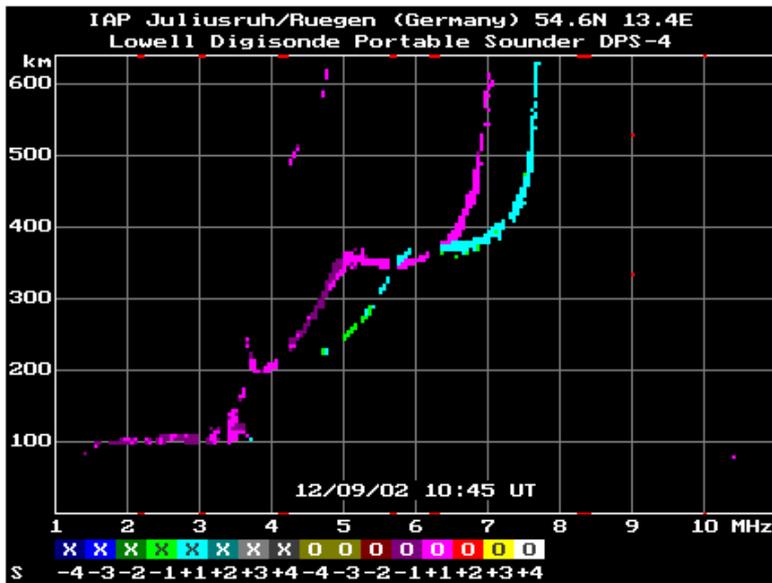


Bild 3. Negative Auswirkungen eines solaren koronalen Lochs auf die Ionosphäre

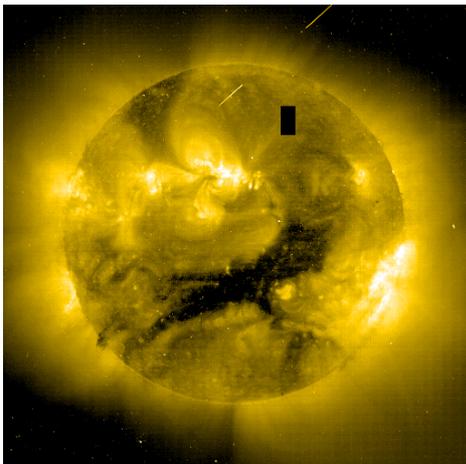


Bild 4: Ein transäquatoriales Koronales Loch am 24.10.2002

Delta-Konfiguration

Magnetisch komplexe und daher brisante Verteilung von Magnetpolen innerhalb einer zumeist ausgehenden Sonnenfleckenregion. Im Zentrum befindet sich ein großes → Cluster mit Flecken gleicher Polarität, das wie eine Insel (Insel-Delta) von Strukturen entgegengesetzter Polarität (→ Penumbra) zusammengepreßt wird. Von oben dunkel erscheinende → Protuberanzen umgeben das Insel-Delta in riesigen Bögen. Wenn sich zudem auf- und absteigende Magnetlinien verdrillen, erfolgt im allgemeinen bald die Explosion in Form eines Flares. D. sind Früherkennungszeichen für mögliche Flares. Der genaue Zeitpunkt für die Eruption ist leider nicht vorhersagbar.

Radioburst

Solare Strahlungsausbrüche im Bereich der Funkwellen. Während energiereicher Flares (schon >C1) kann auch die Radiostrahlung z. B. im 10,7-cm-Flux-Bereich (2695 MHz) über den Tageshintergrund teils drastisch ansteigen. Sie wird wie der → Flux gemessen. Ein R. (im DW-SIW-Bericht: 10flare) von 450 fu entspricht demnach $450 \text{ W}^{-22} \text{ m}^{-2} \text{ Hz}^{-1}$. R. sind gute Indikatoren für eine mögliche Geoaktivität des sie verursachenden Flares.

Typ i: Viele kurze, etwa eine Sekunde dauernde, schmalbandige Ausbrüche über Grundrauschen aus Regionen bzw. aktiven Protuberanzen auf der Sonnenoberfläche 70 und mehr Minuten nach dem Flareinsatz etwa zwischen 40 und 200 MHz. Dauer: Stunden bis Tage.

Radiosweep

Frequenzveränderlicher Radioburst ("sweep" gleich "fegen").

Typ ii: Oft mit (vor allem) zweiter Harmonischer (doppelter Frequenz) auftretender Radioburst mit sinkender Frequenz, Dauer bis etwa 30 Minuten. Ursache: Energetische Flares, Protonflares, (magneto-hydrodynamische) Schockwellen. Der Typ ii und Typ iii (s. u.) entsteht im interplanetaren Raum, wenn ein schneller Elektronenstrahl durch den Sonnenwind eilt und z. B. nach 20 Sonnenradien eine Umgebung erreicht, wo das Elektronenplasma bei 250 kHz schwingt und von ihm erregt wird (Typ ii); je weiter er durch den interplanetaren Raum wandert, desto dünner das Plasma und desto langsamer die Schwingungen (desto kleiner die Frequenz).

Beim Typ iii verläuft der Frequenzabfall in Bursts von ein bis drei Sekunden schneller. Gruppenbursts dauern ein bis fünf Minuten. Bei 6 Sonnenradien ist die Sweepfrequenz etwa 3 MHz; bei 100 Sonnenradien etwa 110 kHz, bei 215 Sonnenradien etwa 50 kHz.

Beim Typ iv treten Breitbandkontinua unterschiedlicher Strukturen auf, die eine Dauer von wenigen Minuten bis zu Tagen haben können.

Ein Typ v mit minutenlangen Kontinua hat immer einen Typ iii als Vorläufer. Die Bursts ähneln dem Typ iii.

Besonders die R. Typ ii/iv sind gute Frühwarnsysteme für mögliche Sturmeinsätze aus demselben solaren Ereignis, aus dem sie stammen. Da sie sich mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten, laufen sie den weitaus langsameren Sturmteilchen im allgemeinen um zwei Tage voraus.