

kumulativen Differenz der Uhren-Ganggeschwindigkeiten von 38 % zwischen den Beobachtern in Galaxien und Voids kommen. Diese haben sich alle in Regionen mit Dichten gebildet, die größer als die kritische Dichte ist.

Es stellt sich heraus, dass das Alter des Universums von der Position des Beobachters abhängt, ebenso die Interpretationen der kosmischen Beschleunigung. Die „Beschleunigung“ ist nicht real, sondern sie ist eine falsche Schlussfolgerung, die auf der Annahme beruht, dass die Uhren der idealen Void-Beobachter mit unseren gleich laufen, doch die Uhren sind heutzutage im Void schneller. Das „Faktum“, dass der Beginn der Beschleunigung mit der Epoche zusammenfällt, in der die Voids zu wachsen beginnen, ist also keine zufällige Übereinstimmung.

Mit meinen neuen Ideen habe ich eine erste Näherung für ein Modell-Universum entwickelt, das bedeutende unabhängige Tests bestanden hat. Es könnte sogar viele festgestellte Anomalien erklären. Zum Beispiel weicht die beobachtete Menge des primordialen Lithiums von den Erwartungen der Standard-„Concordance“-Kosmologie ab. Das Standard-Modell nimmt überall eine gleichmäßige Raumkrümmung an, so dass alle idealen Beobachter einer gegebenen Epoche die gleiche Temperatur der Mikrowellen-Hintergrund-Strahlung messen.

Wegen der unterschiedlichen Raumkrümmungen und Gravitations-Energien zwischen Voids und Galaxien misst der ideale Void-Beobachter jedoch eine niedrigere Mikrowellen-Hintergrund-Temperatur als wir. Das beeinflusst die Kalibrierung der Anzahl der Nukleonen pro kosmischem Mikrowellenphoton und folglich die Kalibrierung der Urknall-Nukleosynthese-Berechnung, welche die primordiale Lithium-Menge vorhersagt.

Es wird Jahre der Weiterentwicklung und viele unterschiedliche Tests erfordern, bis sich die vorgeschlagenen Erklärungen der Dunklen Energie als Erfolg oder Fehlschlag herausstellen. Auf welche Weise das Puzzle der Dunklen Energie auch immer enträtselt wird, eine neue Epoche der Astronomie hat uns das reiche und komplexe Universum enthüllt, das genaue Betrachtungen der Annahmen erfordert, die wir bisher als selbstverständlich hinnahmen. Bevor wir uns exotische Materiefelder erträumen oder unsere grundlegenden Gravitationsgesetze modifizieren, sollten wir zuerst gründlich über die noch unerforschten Gebiete von Einsteins Theorie nachdenken.

*Die Redaktion dankt Herrn Prof. WILTSHIRE für seine Bereitschaft, seine Ideen in den Olbers-Nachrichten zu erläutern. Frau Dipl. Phys. Bärbel WALINSKI hat diesen Artikel aus dem Englischen übersetzt.*



## Vermisste Sonnenflecken

### Der Beginn eines neuen Maunder-Minimums? Über Bedeutung und Vorhersagemöglichkeiten der Entwicklung solarer Aktivitäts-Zyklen (Teil I)

Ulrich v. Kusserow

#### 1. Einleitung

Der neue, seit Beginn der Zählung um 1755 jetzt mit der Nummer 24 versehene solare Aktivitätszyklus begann am 12. Dezember 2007. Erstmals an diesem Tag wurden in dem vom Sonnensatelliten SOHO (Solar and Heliospheric Observatory) erstellten Magnetogramm in höherer ( bei etwa 35°) nördlicher heliografischer Breite Magnetfeldstrukturen mit vorangehender südlicher magnetischer Polarität aufgezeichnet. Und am 4. Januar 2008 war es dann endlich soweit. Ebenfalls in der nördlichen Hemisphäre tauchte hier für wenige Tage eine erste Fleckengruppe des neuen Zyklus auf. Regelmäßig unseren Heimatstern beobachtende Sonnenfreunde, die nun gehofft hatten, dass in den folgenden Jahren bis zum heutigen Tag (Anfang Juni 2009) endlich wieder häufiger, und dann auch größere, dem 24. Sonnenzyklus zuzuschreibende Fleckengebiete zu bewundern sein würden, wurden in letzter Zeit doch schwer enttäuscht. Wer nicht gerade ein H-alpha-Filter für sein Teleskop zur Verfügung hat oder die Sonnenscheibe zur Beobachtung der Protuberanzen mit einem Koronografen abschirmen kann, der sieht in letzter Zeit auf der Sonne fast gar nichts. Wo bleiben nur die Sonnenflecken?

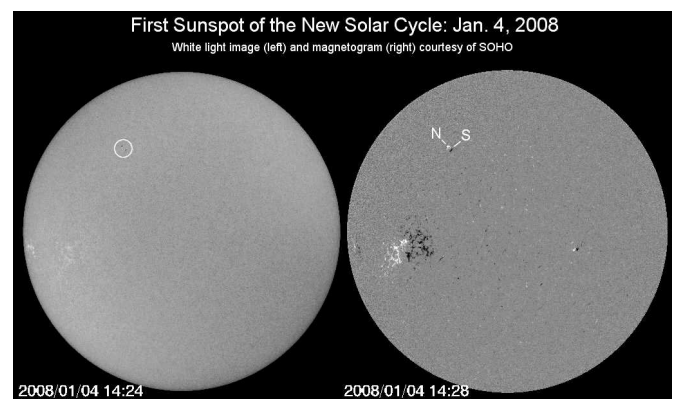


Abb. 1: Erster Sonnenfleck des 24. Sonnenzyklus, Weißlicht-Aufnahme (links), Magnetogramm (rechts)  
© SOHO MDI NASA ESA

Bekanntlich schwankt die Zahl der dunklen Flecken auf der Sonnenoberfläche im Verlaufe des im Mittel etwa 11,1 Jahre dauernden solaren (so genannten WOLF'schen) Fleckenzklus sehr stark und nahezu periodisch.

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

**g** Anzahl der zu beobachtenden Fleckengruppen, mit dem Faktor 10 besonders gewichtet (ein isolierter Einzelfleck zählt als Gruppe)

**f** Anzahl der zu beobachtenden einzelnen Flecken

**k** persönlicher Korrekturfaktor eines Beobachters zur Angleichung seines Messergebnisses an ein Standard-Beobachtungssystem in Belgien

In Abb. 2 ist die Entwicklung der gemäß nebenstehender Formel zu ermittelnden dimensionslosen, so genannten Fleckenrelativzahl R im Verlaufe der Zeit von 1750 bis Anfang 2009 dargestellt. Die maximale Fleckenrelativzahl in den bisherigen 23 Zyklen (siehe Durchnummerierung im Schaubild) nimmt danach im monatlichen Mittel Werte zwischen etwa 60 und 240 an. Die Abstände der Maxima schwanken dabei zwischen 7 und 15 Jahren. Stärkere Aktivitätszyklen setzen oft später ein, sind zeitlich kürzer und zeigen in der Regel zu Beginn einen steileren Anstieg der Fleckenrelativzahl (WALDMEIER-Effekt).

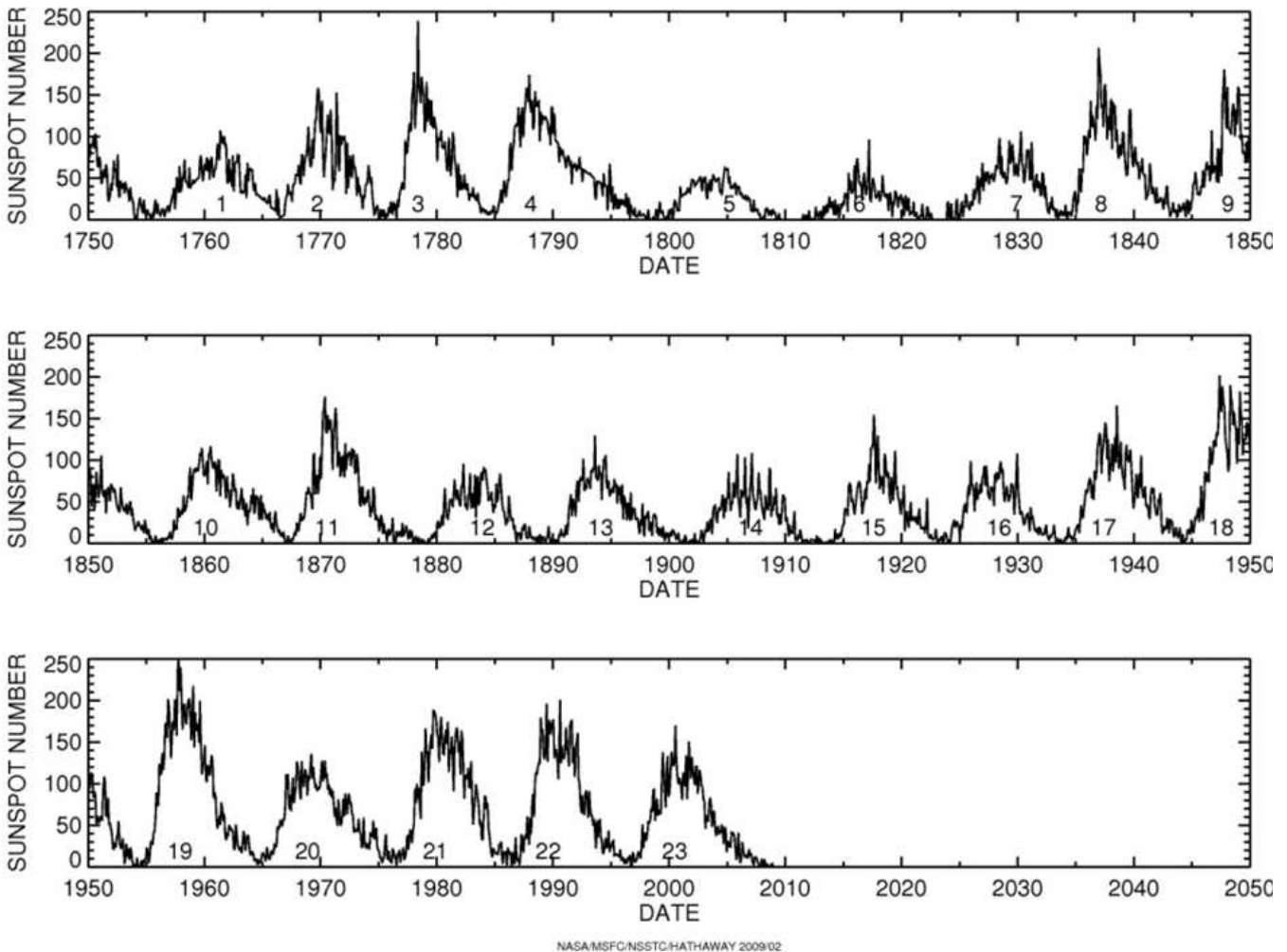


Abb. 2: Entwicklung der monatlich gemittelten Sonnenfleckenrelativzahlen von 1750 bis Anfang 2009 © NASA/MSFC/Hathaway 2009

Könnte die in den letzten Jahren so niedrige Fleckenrelativzahl dafür sprechen, dass auf der Sonne nach vielen Jahrzehnten zunehmend hoher Aktivität jetzt ein so genanntes Großes Aktivitätsminimum bevorsteht, von denen es im vergangenen Jahrtausend unregelmäßig immer wieder schon so einige gab?

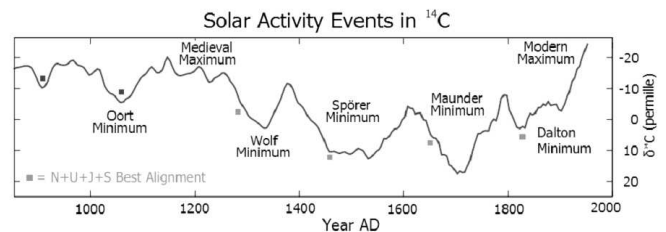


Abb. 3: Rekonstruktion des Aktivitätsverlaufs der Sonne mit Hilfe der <sup>14</sup>C - Radiokarbonmethode vom Jahr 900 bis 1950 © Wikipedia

Natürliche zeitliche Schwankungen des Verhältnisses der Häufigkeit des  $^{14}\text{C}$ -Kohlenstoffisotop zu der des üblichen  $^{12}\text{C}$ -Atoms in alten Baumstämmen geben Auskunft über den Einstrom kosmischer Strahlung aus hochenergetischen Prozessen wie Supernova-Explosionen im fernen Universum. Die Modulation dieser Strahlung wird dabei wesentlich durch die Sonnenaktivität beeinflusst. Hohe Aktivität mit starken Magnetfeldern als Schutzschirm schützt die Erde vor kosmischer Strahlung, verringert dadurch das  $^{14}\text{C} / ^{12}\text{C}$  - Verhältnis. Niedrige Aktivität vergrößert es. Mit Hilfe dieser so genannten  $\text{C}^{14}$ -Radiokarbonmethode lässt sich so der Aktivitätsverlauf der Sonne auch bis zurück in Zeiten rekonstruieren, in denen keine Sonnenflecken gezählt werden konnten. In Abb. 3 erkennt man mit den Oort- (1010 bis 1050), Wolf- (1280 bis 1340), Spörer- (1450 bis 1550), Maunder- (1645 bis 1715) und Dalton- (1790 bis 1830) Minima die Phasen, in denen die Sonnenaktivität im vergangenen Jahrtausend über mehrere Sonnenfleckenzyklen hinweg tatsächlich auffallend niedrig war. Abb. 4 veranschaulicht noch einmal sehr eindrucksvoll, wie niedrig die Sonnenflecken-Relativzahl insbesondere während der 70 Jahre des nach dem englischen Astronomen Edward Walter MAUNDER benannten Minimums war.

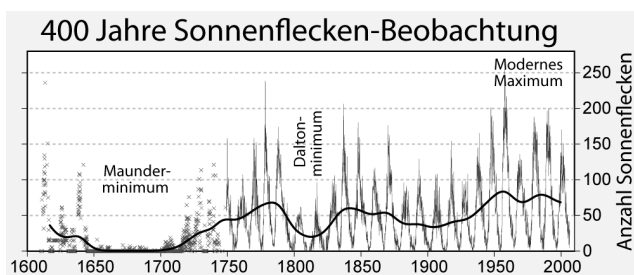


Abb. 4: Schwankungen der Sonnenfleckenrelativzahl in den vergangenen 400 Jahren © Wikipedia

Mit diesem Minimum der Sonnenaktivität verbinden heute Klimaforscher interessanterweise die Erkenntnis, dass exakt in diese Zeit die kältesten Jahre der so genannten kleinen Eiszeit fielen, während der in Europa, Nordamerika und China, vielleicht sogar auch in anderen Teilen der Welt viele besonders kalte Winter auftraten. Umgekehrt war um 1200 (siehe das Medieval Maximum in Abb. 3) die Sonnenaktivität über fast zwei Jahrhunderte besonders hoch. Und damals gab es vom 10. bis 14. Jahrhundert eine Mittelalterliche Warmzeit in der Nordatlantik-Region!

Ist es da vielleicht auch kein Wunder, dass die Temperaturen fast überall auf der Erde in den letzten Jahrzehnten so deutlich gestiegen sind? Ist dafür vielleicht das Moderne Maximum der Sonnenaktivität (s. Abb. 3) wesentlich mitverantwortlich? Oder sind es nicht doch eher wir Menschen, die vor allem

durch den verstärkten anthropogenen Treibhauseffekt die Klimabedingungen auf unserem Planeten schon seit mehreren Jahrzehnten entscheidend verändern? Die Sonne ist natürlich der Motor, der das Klimageschehen auf unserem Planeten in komplexer Weise treibt. Es gibt inzwischen auch verlässliche Aussagen darüber, wie beispielsweise zyklusbedingte Schwankungen in der solaren UV-Strahlung durch Veränderung der Ozonschicht sowie großskaliger Strömungsmuster in der Atmosphäre Einfluss auf das Erdklima nehmen. Es gibt darüber hinaus – bisher aber nicht wirklich bestätigte – Spekulationen darüber, wie solare Magnetfeldstrukturen im Zusammenhang mit dem Einstrom kosmischer Strahlung und Wolkenbildungsprozessen in der Erdatmosphäre das Klima modulieren können. Anerkannte Klimaforscher gehen im Übrigen davon aus, dass der Einfluss der Sonne auf die aktuell zu beobachtenden Klimaveränderungen in jedem Fall auf maximal 30 % beschränkt bleibt.

Hochgerechnetes Temperaturprofil bis zum Jahre 2030

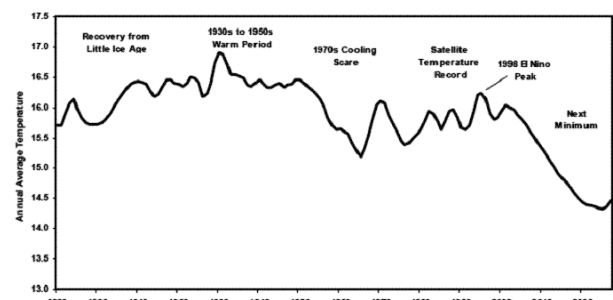


Abb. 5: Spekulationen über die zukünftige Entwicklung der globalen Erdtemperatur bis 2030

© David C. Archibald

Angekündigt als ein im Bereich der Krebs- und Klimaforschung sowie der Erdöl-Exploration arbeitender Wissenschaftler konnte der australische Unternehmer David C. ARCHIBALD auf der International Conference on Climate Change (ICCC) im März 2008 eine in der Presse viel beachtete Präsentation mit dem Titel „Solar Cycle 24: Implications for the USA“ („Der 24. Sonnenzyklus – Auswirkungen auf die USA“) vorführen (siehe auch seine Homepage unter <http://www.davidarchibald.info/>). Der Referent ist ein vehementer Verfechter der Idee, dass die auf unserem Planeten zu beobachtenden drastischen Klimaveränderungen hauptsächlich durch die Sonne verursacht werden. Ohne wirklich tiefgehende Faktengrundlage geht er in mehreren anderen Beiträgen davon aus, dass die Amplitude der kommenden solaren Aktivitätszyklen drastisch zurückgehen wird, dass wir uns auf eine Art Maunder-, zumindest auf ein demgegenüber schwächeres Dalton-Minimum zu bewegen, und dass es dadurch auf der Erde in den nächsten Jahrzehnten merklich kälter wird, sich dieser Prozess in Zukunft noch beschleunigen kann.

Seine sehr spekulative Prognose geht von einem Temperaturrückgang von etwa 2,2 °C in den nächsten 20 Jahren aus (s. „Next Minimum“ in Abb. 5). In seinem Artikel „One Still Free“, s. <http://onestillfree.blogspot.com/2008/04/climate-change-article-by-david.html> (er darf sich „noch frei“ äußern) fordert er deshalb unter anderem, dass wieder viel mehr Kohlekraftwerke gebaut werden sollen, damit der menschengemachte Treibhaus-Effekt noch verstärkt wird, damit trotz der von ihm befürchteten Abkühlung des Planeten auf Grund der stark sinkenden Sonnenaktivität die Temperaturen auf der Erde doch einigermaßen stabil bleiben können, und damit die bei Abkühlung verringerte Produktivität der Agrarwirtschaft (angesichts der zunehmenden Bevölkerungsdichte der Erde erscheint dies ja, zumindest oberflächlich gesehen, ganz sinnvoll) auch wieder stärker anwächst.

Abgesehen davon, dass der physikalische Mechanismus, durch den die magnetische Aktivität der Sonne Einfluss auf das Erdklima nehmen soll (s. Abb.6), überhaupt noch nicht wirklich verstanden und gesichert ist, stellt sich den Sonnenforschern vor allem doch erst einmal die Frage nach den Vorhersagemöglichkeiten für die Entwicklung der Sonnenaktivität über lange Zeiträume hinaus. Kann man jetzt wirklich schon Aussagen darüber treffen, wie der 24. oder danach auch der 25. Fleckenzklus aussehen wird, wie lange diese Zyklen dauern werden, welche maximalen Fleckenrelativzahlen in ihnen erreicht werden können? Welche statistisch begründeten Vorhersagemethoden gibt es heute eigentlich in der wissenschaftlichen Literatur? Reichen Schlussfolgerungen anhand solcher Statistiken allein schon zur Formulierung verlässlicher Vorhersagen aus? Müsste man nicht eigentlich auch physikalisch relevante Prozesse einbeziehen, die Entwicklung der solaren Magnetfeldstrukturen erst einmal modellieren, um daraus Vorhersagen anhand von umfangreichen Simulationsrechnungen zu gewinnen, deren Aussagewert dann abschließend sicherlich erst einmal anhand umfangreicher Vergleiche mit den aus der Beobachtung gewonnenen Daten verlässlich verifiziert werden müsste?

In diesem Artikel sollen im Folgenden zunächst die Argumente gesammelt werden, die generell für eine gründliche Erforschung der Entwicklung und Vorhersagemöglichkeiten charakteristischer Eigenschaften zukünftiger solarer Aktivitätszyklen sprechen. Anschließend werden die typischen Eigenschaften der Sonnenflecken im Verlaufe der Zyklen erläutert. Es soll dann erklärt werden, wie die Sonnenflecken als besonders charakteristisches Element zur Beschreibung der Sonnenaktivität eigentlich entstehen. Im fünften Teil wird mit dem Fluss-Transport-Dynamo eine moderne Theorie zur Erzeugung und Entwick-

lung der für den Verlauf der Sonnenzyklen so relevanten solaren Magnetfelder vorgestellt. Den Abschluss bildet die Erläuterung der vielfältigen, zum einen anhand statistischer Auswertungen, mit Hilfe von Beobachtungs- und Messdaten aus früheren solaren Zyklen – zum andern auf physikalischer Grundlage, mit Hilfe von Dynamomodellen entwickelten Vorhersagemethoden. Es soll geprüft werden, ob hiermit wirklich eine Vorhersage über den Verlauf des aktuellen 24. Sonnenzyklus möglich ist.

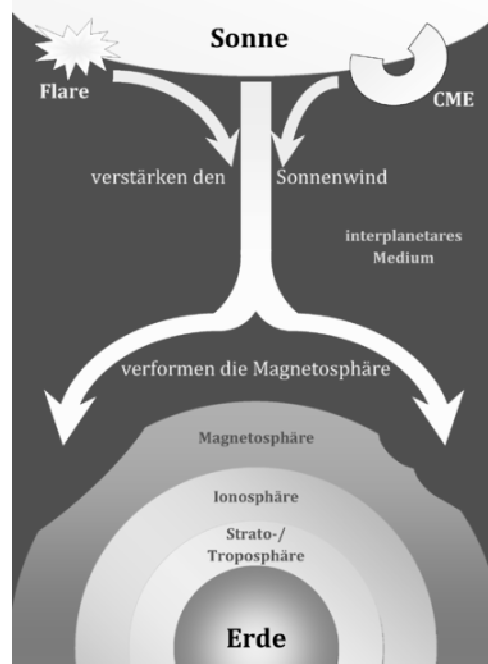


Abb. 6: Veranschaulichung der Einflusswege solarer Flares, koronaler Masseauswürfe und des Sonnenwindes auf die Erdmagnetosphäre und tieferliegende Erdatmosphärenschichten ©Wikipedia

## 2. Gründe für die Notwendigkeit der Erforschung solarer Aktivitätszyklen

Sicherlich ist es sehr sinnvoll, den Einfluss des Sonnenzyklus auf das System Erde und die Menschen darin intensiv zu studieren. Sicherlich gibt es neben der Einflussnahme auf das Erdklima auch viele weitere gute Gründe hierfür. So nimmt die Sonnenaktivität heute mehr und mehr Einfluss auf menschliche Aktivitäten, weil weltraumorientierte Technologien zunehmend an Bedeutung gewinnen. Wichtige Satellitenfunktionen werden durch das von der Sonne induzierte Weltraumwetter wesentlich beeinflusst. Satelliten können sich bei größeren Störungen abschalten, wichtige Bauelemente unwiederbringlich zerstört werden. Bei erhöhter Sonnenaktivität gelangen Satelliten durch verstärkte Reibung an von der Sonne ausgesandten Partikeln in niedrigere Umlaufbahnen, müssen gegebenenfalls unter größerem Energieaufwand wieder angehoben werden, bevor sie möglicherweise ganz abstürzen. Die Gesundheit, in besonderen Fällen oder nach längerem Aufenthalt im

All selbst das Leben von Astronauten im Orbit, bei Weltraumspaziergängen, aber auch innerhalb von Raumstationen, auf Flügen außerhalb der in Grenzen noch schützenden Erdmagnetosphäre ist durch solare Strahlenbelastung stark gefährdet (s. Abb. 7).

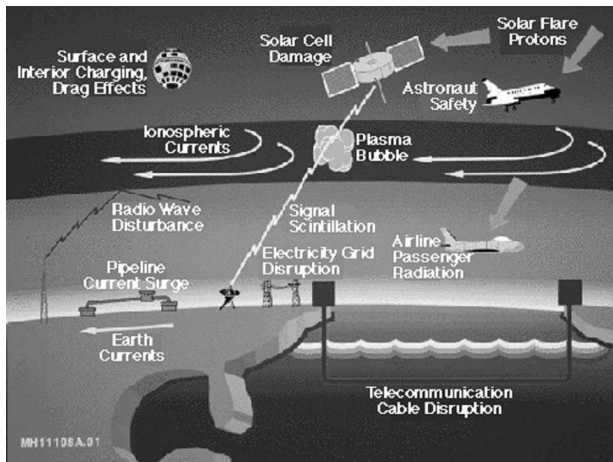


Abb. 7: Darstellung verschiedener Einflussmöglichkeiten der Sonnenaktivität auf die Erde und die menschliche Gesellschaft © L. J. Lanzerotti, Bell Laboratories, Lucent Technologies, Inc.

Die Teilchenstrahlung aus dem Sonnenwind sowie den magnetisierten interplanetaren Plasmawolken beeinträchtigen den Flugverkehr auf Flugrouten über den Polargebieten mehr oder weniger stark. 1999, in einem Jahr hoher Sonnenaktivität, waren beispielsweise wegen der anhaltend zu hohen Strahlenbelastung für Passagiere und Flugpersonal nur insgesamt 12 Polflüge möglich. 2005 konnten die Fluggesellschaften dagegen eine Menge Treibstoff sparen, indem sie auf deutlich kürzeren Flugrouten insgesamt 1.402 Mal die Polgebiete überflogen. Durch Einflüsse hoher Sonnenaktivität auf das Magnetfeld der Erde werden unter Umständen hohe Spannungen in leitenden Stoffen induziert, die zur Überlastung, sogar zur Zerstörung von Transformatoren in Kraftwerken führen können. 1989 fiel aus diesem Grund in Quebec in Kanada für einige Tage der Strom für eine Million Menschen aus. Rohrleitungen korrodieren in einem solchen Zusammenhang langfristig, wenn durch sie häufiger hohe Induktionsströme fließen. Solare Radioausbrüche können zudem den Funkverkehr und die GPS-Navigation wesentlich beeinträchtigen.

Die Sonne ist der Stern, ohne den unser Leben gar nicht möglich ist. Erst wenn wir die physikalischen Prozesse in seinem Inneren und in seiner Atmosphäre tiefer verstehen, dann durchschauen wir auch die Grundlagen des Lebens auf der Erde. Dann können wir nachhaltige Maßnahmen für eine gesunde Entwicklung unseres Planeten auch in Zukunft gestalten. Darüber hinaus stellt die Physik der Sonne für alle Astrophysiker, auch für die, die über Prozesse im fernsten Universum forschen, wesentliche Grundla-

gen für deren Arbeit zur Verfügung. Sozusagen „vor unserer Haustür“ können Forscher in einem überdimensionalen Plasmalabor magnetische Prozesse mit Teleskopen und „vor Ort“ mit Raumschiffen beobachten und vermessen, analytisch modellieren und in Simulationsrechnungen mit Hilfe moderner Hochleistungs-Computer imitieren. Es ist selbstverständlich, dass wir verstehen wollen, wie sich der Aktivitätszyklus der Sonne entwickelt. Natürlich wollen wir dessen Entwicklung auch gerne vorhersagen können!

### 3. Typische Eigenschaften und die Entstehungsgeschichte der Sonnenflecken

Die Lebensdauer einzelner Flecken beträgt im Mittel nur einige Tage. Größere Flecken können aber auch mehrere Wochen bis Monate bestehen bleiben, verändern ihr Aussehen dabei deutlich. Der bezüglich der Sonnenrotation vorangehende Fleck einer im Wesentlichen in Ost-West-Richtung ausgerichteten bipolaren Fleckengruppe liegt meist näher zum Sonnenäquator hin (JOYs Gesetz), ist häufiger ein Einzelfleck, eher größer und weiter entwickelt als die zahlreicheren kleineren Flecken der nachfolgenden Polarität (s. Abb. 8). Außerdem verlaufen hier die magnetischen Feldstrukturen unter einem geringeren Neigungswinkel gegenüber der Sonnenoberfläche als in den nachfolgenden Flecken.

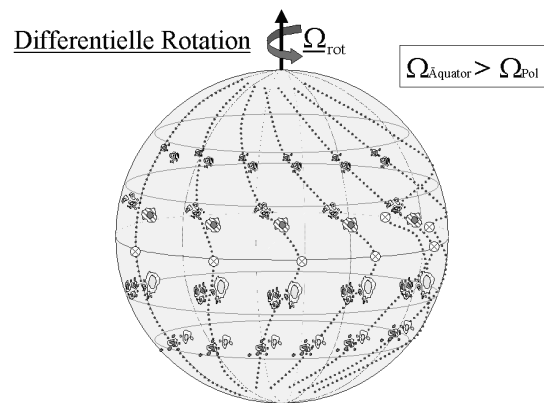


Abb. 8: Lage und Struktur der bipolaren Fleckengruppen auf Grund der differentiellen Rotation © Ulrich v. Kusserow

Im Laufe der Zeit breitet sich die gesamte bipolare Fleckengruppe aus, wobei sich die vorangehenden Flecken in Richtung der Sonnenrotation deutlich schneller vom Schwerpunkt der Gruppe weg bewegen. Dies hängt damit zusammen, dass die Sonnenoberfläche äquatorwärts mit einer deutlich höheren Winkelgeschwindigkeit rotiert als polwärts. Diese als „differentielle Rotation“ bezeichnete Eigenschaft führt dazu, dass die Umlaufzeit der Sonne am Äquator mit weniger als 27 Tagen deutlich kürzer ist als an den Polen. Die Umlaufzeit beträgt hier etwa 35 Tage.

Im Verlaufe des Fleckenzklus bis zum Maximum der Fleckenaktivität stimmt die Polarität des vorangehenden Fleckes im Übrigen jeweils mit der Polarität magnetischer Schichten in Polnähe auf der gleichen Hemisphäre überein. Bei abnehmender Fleckenzahl zum Ende des Zyklus hin beobachtet man in hohen heliografischen Breiten beider Hemisphären dann jedoch jeweils eine Umkehrung der magnetischen Polaritäten.

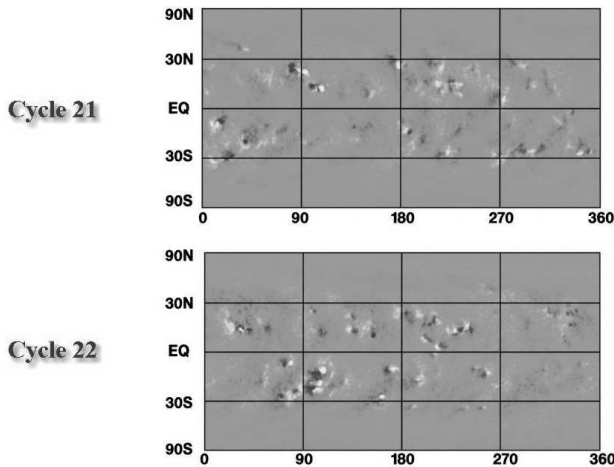


Abb. 9: Breiten- und längenabhängige Verteilung der magnetischen Polaritäten entsprechend dem Hale'schen Gesetz (hell: Nordpolarität; dunkel: Südpolarität) während der solaren Aktivitätszyklen 21 und 22.

© NASA/ Hathaway

Die Polarität des vorangehenden Flecks innerhalb eines Zyklus mit geradzahlgiger Nummer (zum Beispiel im aktuellen 24. Zyklus) ist auf der Nordhemisphäre stets negativ (Südpolarität), auf der Südhalbkugel genau anders herum, nämlich positiv (Nordpolarität). In Aktivitätszyklen mit ungeradzahlgiger Nummer (zum Beispiel der 23. Zyklus) sind die Polaritätsverhältnisse demgegenüber vertauscht (s. Abb. 9). Etwa alle 11,1 Jahre kehrt sich also die Polarität um, so dass der an den magnetischen Eigenschaften auf der Sonne orientierte Aktivitätszyklus in Wirklichkeit durchschnittlich eine Länge von 22,2 Jahren hat. Die Tatsache, dass die Polarität des vorangehenden Flecks in der nördlichen Hemisphäre entgegengesetzt zur Polarität des vorangehenden Flecks der südlichen Hemisphäre ist und dass sich die Polaritäten von einem Zyklus zum folgenden umkehren, wird als HALE'sches Polaritäten-Gesetz bezeichnet.

Die parallel zum Sonnenäquator verlaufenden Zonen, in denen die Sonnenflecken unregelmäßig und in ihrer Häufigkeit immer wieder auch asymmetrisch, bezogen auf die beiden Hemisphären, entstehen, wandern im Verlaufe des Zyklus beginnend bei 35°- 40° heliografischer Breite bis auf etwa 5° hin zum Äquator (SPÖRERS Gesetz). Während des Maximums der Aktivität entstehen Flecken in beiden Hemisphären vorwiegend bei etwa 15°. Dieser Sach-

verhalt lässt sich auch eindrucksvoll im so genannten Schmetterlingsdiagramm anhand von Abb. 10 veranschaulichen.

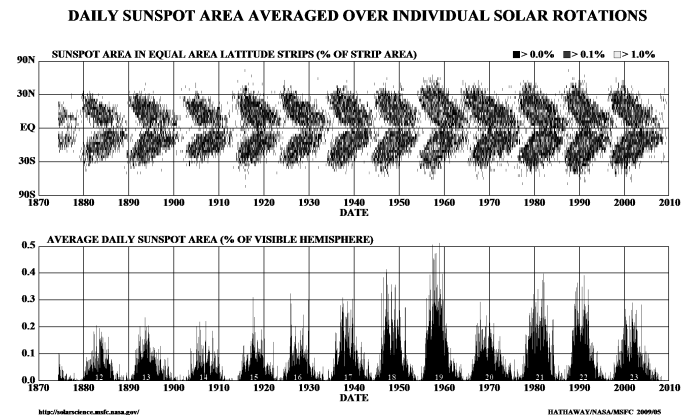


Abb. 10: Darstellung der zeitlichen Entwicklung der Lage (oben, im sogenannten Schmetterlings-Diagramm) und Größe der beobachteten Sonnenflecken-Flächen (unten)

© NASA/NSSTC/Hathaway

Auf der horizontal beziehungsweise vertikalen Koordinatenachse können das Datum (von 1875 bis 2005) sowie die heliografische Breite (vom Südpol 90S über den Äquator EQ zum Nordpol 90N der Sonne) ermittelter Messdaten abgelesen werden. An angemessener Stelle (also zeit-, hemisphären- und breitenabhängig) im Diagramm eingetragen und entsprechend seiner Größe unterschiedlich hell kodiert, ist der Prozentsatz der jeweils über eine Sonnenrotation gemittelten täglichen Fläche veranschaulicht, die von Sonnenflecken relativ zur Gesamtfläche eines Breitenstreifens eingenommen wird. Diese Fläche ist nahezu proportional zur Sonnenflecken-Relativzahl und zeigt deshalb in ihrer Gesamtheit in Abhängigkeit von der Zeit eine sehr ähnliche Entwicklung wie diese (s. Abb. 10 unten, vergleiche mit Abb. 2).

In der Sonne auftretende magnetische Flussröhren und die sie umgebende geladene und gasförmige, so genannte Plasmamaterie bewegen sich auf Grund der ähnlich wie bei Eisen sehr hohen elektrischen Leitfähigkeit der Materie in Abhängigkeit voneinander so, als ob sie fest aneinander gekoppelt wären. Diese so genannte „Eingefrorenheit“ der Magnetfeldstrukturen in das solare Plasma führt dazu, dass man Feldlinien nicht einfach aus der gasförmigen Materie „herausziehen“ kann, dass andererseits Materieballen auch nicht ohne weiteres in bestehende Magnetfeldstrukturen „eindringen“ können. So ist es leicht verständlich, dass irgendwann einmal meridionale, also von Pol zu Pol ausgerichtete, auch als „poloidal“ bezeichnete magnetische Feldlinien auf Grund der in der Sonne beobachteten differentiellen Rotation parallel zum Sonnenäquator aufgewickelt werden (vergleiche im Folgenden Abb. 8 und 11 ).

Auffallend ist dabei die unterschiedliche Orientierung der (durch die jeweilige Pfeilrichtung gekennzeichnete) in Äquatornähe nahezu in Ost-West-Richtung ausgerichteten magnetischen Feldlinien in den beiden Hemisphären der Sonne. Dies erklärt doch im vereinfachten Modellbild sehr anschaulich, warum die bipolaren Fleckengruppen auf den beiden Sonnenhalbkugeln tatsächlich entgegengesetzte Polaritätsverhältnisse aufweisen müssen!

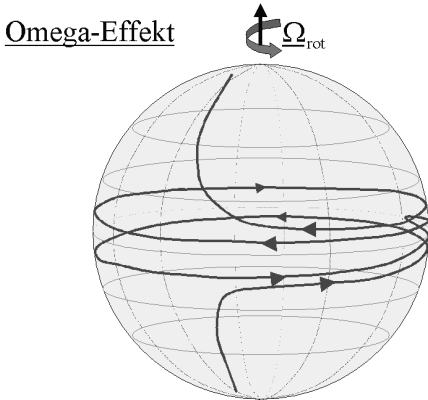


Abb. 11: Aufwicklung ursprünglich poloidaler Magnetfeldstrukturen parallel zum Äquator auf Grund der differentiellen Rotation ( $\omega$ -Effekt) © Ulrich v. Kusserow

Ausgelöst durch verschiedene Instabilitäten, können die im Innern der Sonne durch diesen so genannten  $\omega$ -Effekt erzeugten und über längere Zeit in relativ stabiler Umgebung gespeicherten, als toroidal bezeichneten azimuthalen, nahezu parallel zum Sonnenäquator verlaufenden Feldstrukturen mit hoher magnetischer Flussdichte durch die Konvektionszone der Sonne zur Sonnenoberfläche aufsteigen.

Wegen der Unterstützung durch den magnetischen Druck  $p_m > 0$  ist der Gasdruck  $p_i$  im Innern einer magnetischen Flussröhre bei Druckgleichgewicht  $p_i + p_m = p_a$  kleiner als der Gasdruck außerhalb der Flussröhre ( $p_i < p_a$ ). Bei Annahme gleicher Temperaturen im Innern und Äußeren der Flussröhre ( $T_i = T_a$ ) sowie der Gültigkeit des idealen Gasgesetzes ist dann die Gasdichte proportional zum Gasdruck, und damit auch die Dichte  $\rho$  im Innern kleiner als im Äußeren. Wegen  $\rho_i < \rho_a$  erfährt dann die Flussröhre einen so genannten „magnetischen Auftrieb“.

Abb. 12 veranschaulicht den „Seeschlangen-ähnlichen“ Aufstieg einer magnetischen Flussröhre durch die Konvektionszone. In deren Inneren sinkt die Plasmamaterie dabei entlang der Feldlinien nach unten ab und verhindert so den Aufstieg in den Flanken dieses magnetischen Schlauches. In den Durchstoßpunkten mit der Sonnenoberfläche bilden sich die dunklen Fleckengruppen. Hier ist es nämlich um fast 2.000 Grad kühler als in der umgebenden Photosphäre, weil der Aufstieg besonders heißer Plasmamaterie aus dem Sonneninneren nach dem

Prinzip der „Eingefrorenheit magnetischer Feldlinien“ an diesen Stellen behindert wird.

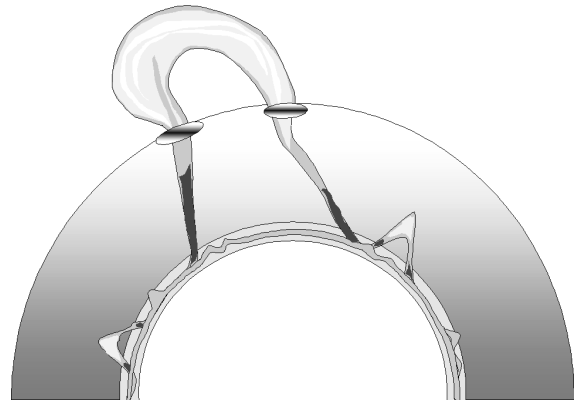


Abb. 12: Modell zur Entstehung bipolarer Fleckengruppen durch magnetischen Auftrieb © Ulrich v. Kusserow

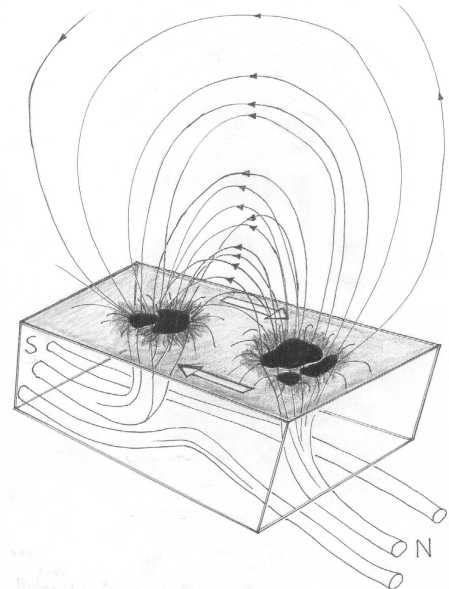


Abb. 13: Skizzierter Feldlinienverlauf in der Umgebung einer bipolaren Fleckengruppe © Ulrich v. Kusserow

In den dünneren äußeren Schichten der Sonnenatmosphäre, innerhalb der Chromosphäre und Korona, können sich die Magnetfeldstrukturen schließlich sehr viel leichter ausbreiten (s. Abb. 13). So entstehen in der Sonnenatmosphäre die vor allem im ultravioletten Licht deutlich zu beobachtenden großräumigen, bogenförmigen Feldstrukturen oberhalb der Aktivitätsgebiete. Natürlich kann man Magnetfelder selbst nicht direkt sehen. Aber die geladenen Teilchen werden ja auf Grund der so genannten Lorentzkraft verstärkt auf Spiralbahnen um die Magnetfeldlinien gezwungen, von wo aus sie Licht aussenden. So lässt sich zumindest indirekt durch sie der Verlauf der solaren Magnetfeldstrukturen nachzeichnen.

(Fortsetzung folgt)

