

## Klimaveränderung – Treibhauseffekt oder Sonnenaktivität?

D. Schmitt and M. Schüssler

Max-Planck-Institut für Aeronomie, Max-Planck-Str. 2, 37191 Katlenburg-Lindau

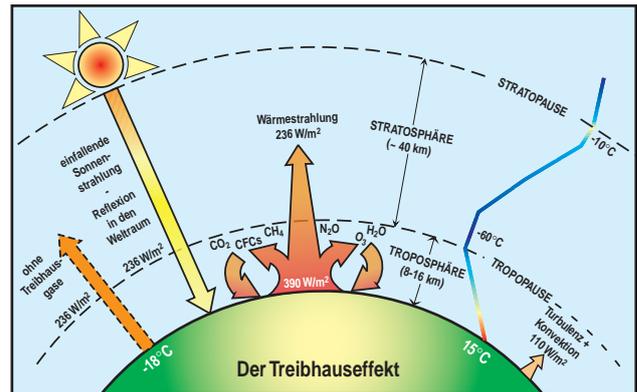
Auf der Erde ist es in den letzten 100 Jahren im Mittel ein halbes Grad wärmer geworden. Wie sich aus der Fieberkurve für die Erde ergibt, vollzog sich diese Erwärmung in zwei Etappen. In der ersten Hälfte des letzten Jahrhunderts stieg die Temperatur um gut 0.3 Grad an, war von 1940 bis 1970 im Mittel in etwa konstant, um seitdem erneut anzusteigen. Solche Temperaturschwankungen sind erdgeschichtlich eigentlich nichts ungewöhnliches. Der rapide Anstieg um weitere 0.3 Grad in den letzten 30 Jahren scheint jedoch ohne Beispiel in den letzten 1000 Jahren zu sein. Sollte er sich fortsetzen, hätte das weitreichende Konsequenzen für die Umwelt und die menschliche Gesellschaft. Um sich rechtzeitig auf zukünftige Rahmenbedingungen einstellen zu können, wäre eine Vorhersage wünschenswert. Dafür muss die Frage nach der Ursache der Erwärmung beantwortet werden.

Ist der Temperaturanstieg menschengemacht? Durch die vermehrte Verbrennung fossiler Stoffe ist die Konzentration des Kohlendioxids in der Atmosphäre seit Beginn der Industrialisierung Mitte des 18. Jahrhunderts um 30% angestiegen, das meiste davon in den letzten Jahrzehnten. Kohlendioxid ist ein Spurengas in der Atmosphäre mit einem Volumenanteil von nur 0.3 Promille. Es trägt aber zum sog. Treibhauseffekt bei. Bei einem weiteren Anstieg seiner Konzentration wird ein dramatischer Temperaturanstieg prognostiziert. Um dem entgegen zu wirken, müssten wir Menschen uns drastisch einschränken.

Aber vielleicht liegt es nicht nur an uns Menschen. Wie sonst ließen sich die Temperaturschwankungen in der Vergangenheit, sicher ohne menschliches Zutun entstanden, erklären. Aufgrund ihrer stärkeren magnetischen Aktivität ist die Sonne in den letzten 100 Jahren heller geworden. Der Helligkeitsanstieg ist nicht groß, nur etwa 0.2%, aber er ist, zumindest bis etwa 1970, gut korreliert mit dem Temperaturanstieg auf der Erde. Trägt die variable Sonne zur Klimaveränderung bei?

In diesem Beitrag konzentrieren wir uns auf den zweiten Aspekt, den möglichen Einfluss der Sonne. Wir stellen unseren Beitrag bewusst in das Spannungsfeld „Klimaveränderung – Treibhauseffekt oder Sonnenaktivität?“ und werden argumentieren, dass in der Vergangenheit möglicherweise die Sonne, in jüngster Zeit dagegen die anthropogene Verstärkung des Treibhauseffekts die dominante Rolle zu spielen scheinen.

Die Sonne ist der Motor des irdischen Wetters und Klimas. Ihre Gesamtstrahlung beträgt  $3.85 \cdot 10^{26}$  W. In der mittleren Entfernung Erde – Sonne von 150 Mio km entspricht dies 1367 W pro Quadratmeter. Diese Größe wurde früher

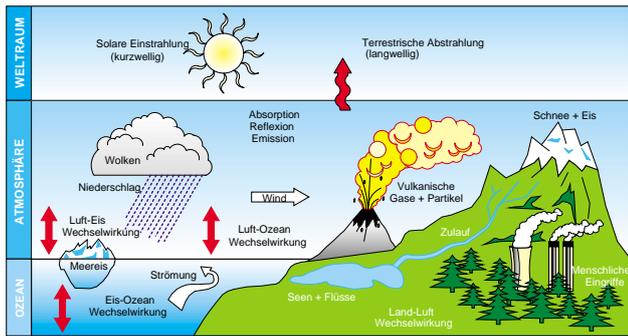


**Abbildung 1.** Die von der Sonne erwärmte Erde strahlt im langwelligen infraroten Spektralbereich Wärme in den Weltraum zurück. Ein Teil dieser Energie wird durch Treibhausgase in der Atmosphäre absorbiert und zur Hälfte wieder zum Erdboden zurückgestrahlt. Dadurch erwärmt sich die Erde weiter. Dieser natürliche Treibhauseffekt wird verstärkt, wenn sich die Konzentration der Treibhausgase erhöht, etwa die des Kohlendioxids durch die Verbrennung fossiler Stoffe durch den Menschen. Man spricht dann vom anthropogenen Treibhauseffekt (MPI für Meteorologie, Hamburg).

„Solarkonstante“ genannt. Wir werden aber sehen, dass sie nicht wirklich konstant ist. Da die Oberfläche der Erdoberfläche viermal größer ist als ihr Querschnitt, entfallen im Mittel auf jeden Quadratmeter Erdoberfläche 342 W. Davon werden etwa 30% „ungenutzt“ in den Weltraum zurückreflektiert, verbleiben also  $240 \text{ W/m}^2$ , die teils in der Atmosphäre, teils am Erdboden, teils in den Ozeanen absorbiert werden und die Erde aufheizen. Das Stefan-Boltzmann'sche Strahlungsgesetz sagt uns, dass sich die Erde damit auf  $-18^\circ\text{C}$  erwärmt.

So aufgewärmt strahlt die Erde im langwelligen Infrarotbereich. Ein Teil dieser Wärmestrahlung wird durch Spurengase in der Atmosphäre, hauptsächlich durch Wasserdampf, Kohlendioxid, Methan und andere Gase, absorbiert und heizt die Atmosphäre zusätzlich auf. Diese strahlt ihre Wärme teilweise wieder zur Erde zurück, wodurch sich die mittlere Temperatur am Boden auf angenehme  $+15^\circ\text{C}$  einstellt. Dies ist der natürliche Treibhauseffekt der Erdatmosphäre.

Erhöht sich die Konzentration der absorbierenden Spurengase, etwa des Kohlendioxids durch vermehrte Verbrennung fossiler Stoffe durch den Menschen, verstärkt sich der Effekt und führt zu einer weiteren Erwärmung. Es ist diese anthropogene Verstärkung des Treibhauseffekts, welche die



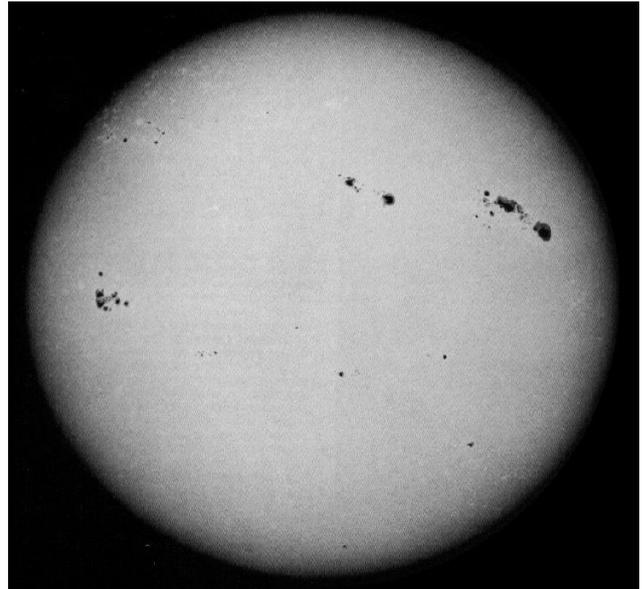
**Abbildung 2.** Das Klima wird bestimmt durch die unterschiedliche Einstrahlung der Sonne, durch Winde und Meeresströmungen und deren komplexe Wechselwirkung mit der Litho- und Biosphäre (MPI für Meteorologie, Hamburg).

Diskussion um die Entwicklung des Klimas bestimmt. Insgesamt ist die Energiebilanz der Erde ausgeglichen, sie strahlt wieder  $240 \text{ W/m}^2$  im Infraroten in den Weltraum ab und befindet sich somit im thermischen Gleichgewicht.

Bisher haben wir nur Mittelwerte betrachtet. Tatsächlich hängt der Energieeintrag vom Winkel ab, mit dem die Sonnenstrahlen einfallen, da sich gleiche Strahlungsmengen auf unterschiedlich große Flächen verteilen. Da die Rotationsachse der Erde schräg auf der Bahnebene ihres Umlaufs um die Sonne steht, fallen die Sonnenstrahlen je nach Jahreszeit mal steiler und mal flacher ein. Je niedriger die Sonne am Himmel steht, umso weniger Strahlungsleistung entfällt auf einen Quadratmeter Erdboden. So ergeben sich die bekannten Klimazonen von den Tropen um den Äquator über die gemäßigten Breiten hin zu den Polargebieten. Ferner sind uns allen die Rhythmen von Tag und Nacht und der Jahreszeiten vertraut. All diese unterschiedlichen Energieeinträge treiben Winde und Meeresströmungen an, die ihrerseits in komplexer Wechselwirkung mit der Topografie und der Biosphäre stehen und das großskalige Klima auf der Erde bestimmen.

Die Sonne strahlt ihre Energie in verschiedenen Wellenlängen ab. Das Maximum ihrer Strahlung liegt im sichtbaren Licht, über 50% ihrer Energie sind hier und im nahen Infraroten. Annähernd strahlt die Sonne wie ein schwarzer Körper von  $5800 \text{ K}$ , der Photosphärentemperatur der Sonne. Die verschiedenen Spektralbereiche werden in unterschiedlichen Höhen in der Erdatmosphäre absorbiert. Röntgenstrahlung wird in der hohen Atmosphäre um  $100 \text{ km}$  zurückgehalten, die UV-Strahlung zum größten Teil in der Ozonschicht der Stratosphäre zwischen  $10$  und  $50 \text{ km}$  Höhe, das sichtbare Licht ebenso wie die Radiostrahlung erreichen den Erdboden, das Infrarote wird in der unteren Atmosphärenschicht bis  $10 \text{ km}$  Höhe, der Troposphäre, absorbiert.

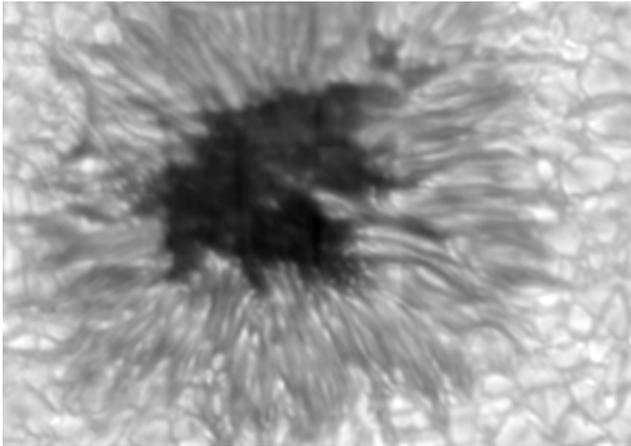
Nachdem die Sonne der Motor des Klimas und Wetters ist, können Veränderungen der Sonnenstrahlung Veränderungen des Klimas verursachen? Im Laufe ihrer Entwicklungsgeschichte über  $5$  Milliarden Jahre ist die Sonne etwa  $30\%$  heller geworden. Dies entspricht einer Temperaturdifferenz von ungefähr  $35$  Grad auf der Erde. Für eine solch kühle Vergangenheit gibt es aber keine Hinweise. Im Gegenteil, die



**Abbildung 3.** Dunkle Sonnenflecken auf der Sonnenoberfläche. Sie tauchen häufig paarweise auf und haben Durchmesser von einigen Tausend bis  $50\,000 \text{ km}$ . Sonnenflecken erscheinen dunkel, weil ihre Temperatur mit ca.  $4000$  Grad um etwa  $2000$  Grad geringer als die ihrer Umgebung ist. Die Ursache dafür ist die Unterdrückung des konvektiven Energietransports durch die bis zu  $0.4$  Tesla starken Magnetfelder, die in den Flecken aus der Sonne austreten. Sonnenflecken leben typischerweise mehrere Tage bis Wochen und „wandern“ durch die Rotation der Sonne auf der sichtbaren Scheibe von Ost nach West (High Altitude Observatory, NCAR, Boulder, Colorado).

Temperatur scheint ein ständiges Auf und Ab durchgemacht zu haben. Es ist unklar, wie die Erde mit dem Problem der kühlen jungen Sonne fertig wurde. In Frage kommen geringere Rückstrahlung oder ein stärkerer Treibhauseffekt. Gehen wir nicht ganz so weit in die Vergangenheit, in der es periodisch wiederkehrende Eis- und Warmzeiten gab. Die letzte Eiszeit liegt  $10\,000$  Jahre zurück. Das Auftreten von Eiszeiten wird mit periodischen Veränderungen der Erdbahn und der Achsenneigung im Verlaufe von Zehntausenden von Jahren in Verbindung gebracht.

Wie steht es aber mit dem Einfluss von kurzfristigen Veränderungen auf der Sonne selbst, die mit ihrer magnetischen Aktivität zusammenhängen. Zu Beginn des 17. Jahrhunderts wurden dunkle Gebiete entdeckt, die über die sichtbare Sonnenscheibe wanderten: die Sonnenflecken. Obwohl man noch nichts über die Natur dieser Flecken wusste, regten sie Spekulationen an, ob sie eine Wirkung auf die Erde und die Menschen haben könnten. Steckten die Sonnenflecken vielleicht auch hinter den unberechenbaren Kapriolen des Wetters? Die Diskussion wurde noch angeheizt, als in der Mitte des 19. Jahrhunderts klar wurde, dass die Zahl der Sonnenflecken in einem regelmäßigen Rhythmus schwankt: etwa alle  $11$  Jahre gibt es besonders viele Sonnenflecken. Man durchforstete die Archive mit Temperaturmessungen und Niederschlagsmengen und fand Zusammenhänge zwischen dem 11-Jahres-Zyklus der Sonne und der Temperatur, dem Pegelstand in großen Binnenseen oder der Häufigkeit



**Abbildung 4.** Eine Detailaufnahme eines Sonnenflecks zeigt eine reichhaltige Struktur mit dem dunklen Kern, der Umbra, und den helleren und filamentartigen Randgebieten, der Penumbra. Ausserhalb des Flecks sieht man die körnige Granulation, eine Auswirkung der Konvektion im äusseren Drittel der Sonne (C. Denker, Universitäts-Sternwarte Göttingen).

von Wirbelstürmen. Ein Problem bei diesen verschiedenen Studien war jedoch, dass es an manchen Orten wärmer zu werden schien, wenn es mehr Sonnenflecken gab, an anderen aber kälter. Oft gab es einen eindrucksvollen Zusammenhang über einige Jahrzehnte, doch dann verschwand der Gleichklang in den Daten oder die Korrelationen kehrten sich gar um. Beruhten die scheinbaren Zusammenhänge nur auf Zufall und statistischen Täuschungen?

Messungen von Raketen und Satelliten aus ergaben, dass die Temperatur in den äusseren Schichten der Erdatmosphäre in Höhen über 100 km im Verlaufe des Sonnenzyklus stark schwankt. Die Ursache ist, dass die Sonne in fleckenreichen Jahren erheblich mehr ultraviolette Strahlung als im Aktivitätsminimum abstrahlt. Die obere Erdatmosphäre wird durch die Absorption dieser Strahlung erwärmt und dehnt sich deshalb im Fleckenmaximum ein gutes Stück weiter in den Weltraum aus. Siehe hierzu den Artikel über das Weltraumwetter im gleichen Heft. Aber auch niedrigeren Höhen prägt der Sonnenzyklus deutlich seinen Stempel auf. In der unteren Stratosphäre in Höhen über 10 km fanden Karin Labitzke und Harry van Loon Temperatur- und Druckschwankungen, die im Gleichtakt mit dem Sonnenfleckenzyklus sind.

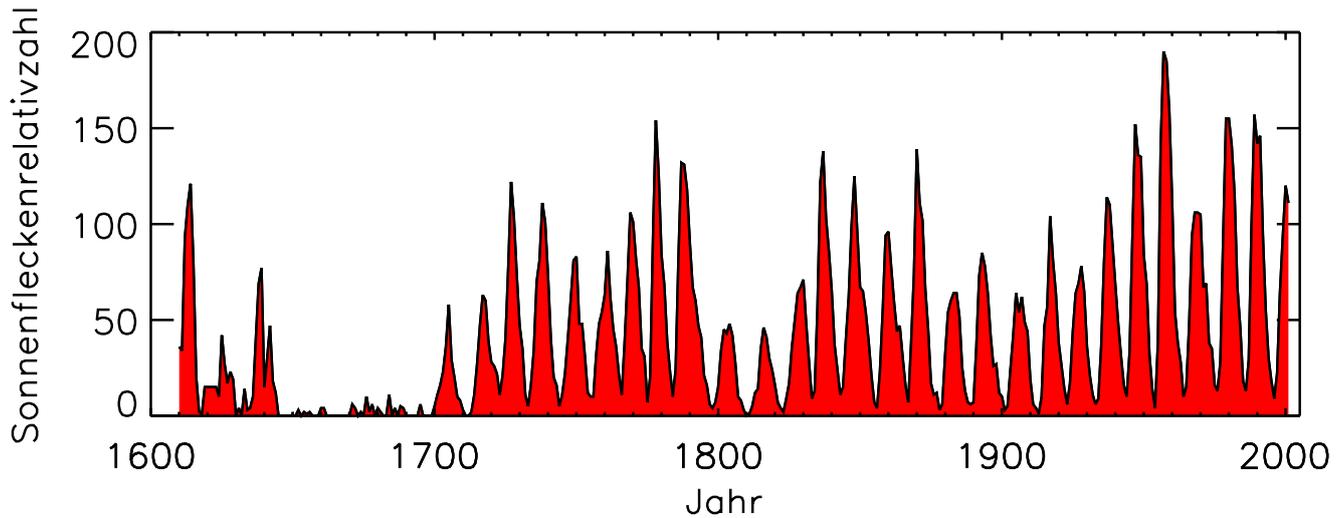
Auch längerfristige Klimaschwankungen in Erdbodennähe laufen teilweise parallel zu entsprechenden Variationen der Sonnenaktivität. So verschwanden in der zweiten Hälfte des 17. Jahrhunderts die Sonnenflecken praktisch ganz, während das Erdklima gleichzeitig eine kühle Periode durchlief. In dieser Zeit stieg auch die Konzentration des radioaktiven Kohlenstoffs  $^{14}\text{C}$  an, wie man anhand der Analyse von Baumringen feststellte.  $^{14}\text{C}$  entsteht in der oberen Atmosphäre durch den Einfall der kosmischen Strahlung, die in Zeiten hoher Sonnenaktivität durch die Magnetfelder im interplanetaren Raum teilweise abgeschirmt wird.  $^{14}\text{C}$  ist also ein indirekter Indikator für die Stärke der Sonnenaktivität, die man auf diesem Wege auch



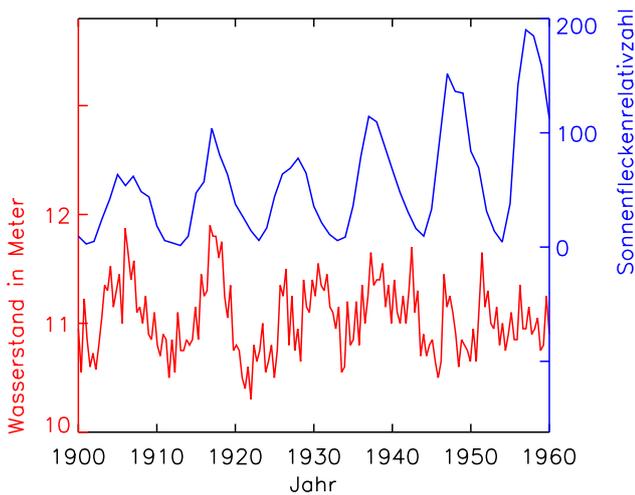
**Abbildung 5.** Die Magnetfelder zwischen den Sonnenflecken reichen in weiten Bögen bis in die hohe Sonnenatmosphäre und tragen zur Aufheizung der Korona auf über eine Million Grad bei. Auf dieser Aufnahme der Raumsonde TRACE sieht man heisses Gas, das sich entlang der magnetischen Kraftlinien ansammelt. Die Korona wird stark durch die Magnetfelder strukturiert (Lockheed Martin Solar and Astrophysics Laboratory, Palo Alto, California).

in die Zeit vor Beginn der systematischen Aufzeichnung von Sonnenflecken zurückverfolgen konnte. Man fand eine weitere Periode mit sehr geringer Sonnenaktivität von 1450 bis 1550, eine Zeit, in der ebenfalls ungewöhnlich kalte Winter vorherrschten. Dagegen gab es besonders starke Sonnenaktivität im 12. Jahrhundert, zeitgleich mit Berichten über ein ausgeprägt warmes Klima. Einen deutlichen Zusammenhang zwischen Sonnenaktivität und Klima fanden auch Eigil Friis-Christensen und Knud Lassen aus Kopenhagen, indem sie die Länge der einzelnen Sonnenfleckenzyklen und die Landtemperatur in der nördlichen Hemisphäre der Erde miteinander verglichen: je kürzer die Fleckenzyklen sind, je schneller also der „magnetische Motor“ der Sonne läuft, um so wärmer ist es auf der Erde.

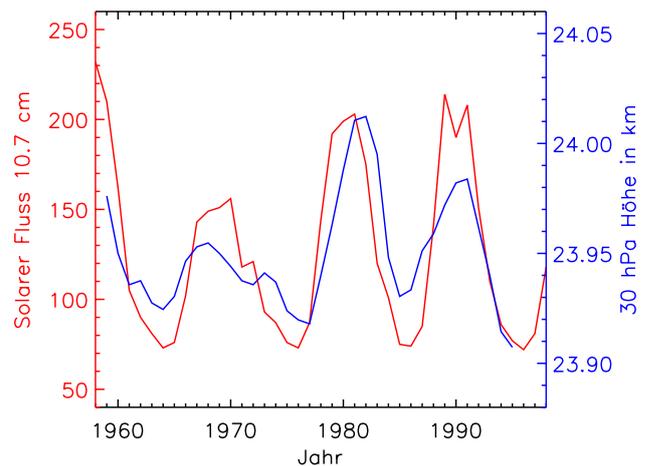
Deuten diese Zusammenhänge also doch auf einen kausalen Zusammenhang zwischen Sonnenaktivität und Schwankungen des Erdklimas hin? In welchem Maße könnte die im 20. Jahrhundert immer aktiver werdende Sonne an der globalen Erwärmung um etwa 0.5 Grad seit 1900 beteiligt sein? Um diese Frage zu beantworten, muss man zunächst die physikalischen Mechanismen finden und studieren, durch welche die Sonnenaktivität auf das Klimageschehen einwirken könnte. Warum sollten die dunklen Flecken ausgerechnet ein wärmeres Klima bewirken? Eine mögliche Antwort liefern Messungen der von der Sonne auf die Erde einfallenden Strahlungsleistung, die seit 1978 von Satelliten aus vorgenommen werden. Die „Solarkonstante“ von etwa 1.37 Kilowatt pro Quadratmeter erwies sich als leicht veränderlich. Wenn große Sonnenflecken auftauchen, verringert sich die Strahlungsleistung erwartungsgemäss kurzzeitig um bis



**Abbildung 6.** Die Zahl der Sonnenflecken schwankt in einem regelmäßigen Zyklus von etwa 11 Jahren. Die Maxima sind unterschiedlich stark ausgeprägt. In der zweiten Hälfte des 17. Jahrhunderts war die Sonne fast fleckenlos (H. Wöhl, Kiepenheuer-Institut für Sonnenphysik, Freiburg).



**Abbildung 7.** Während der Wasserstand des zentralafrikanischen Viktoriasees von 1900 bis 1924 im gleichen Takt mit dem Sonnenfleckenzyklus schwankte, lässt sich in der darauffolgenden Zeit kein Zusammenhang mehr feststellen (Hoyt und Schatten, S. 134).

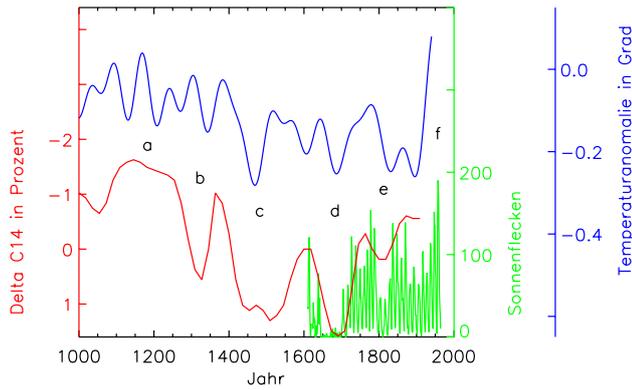


**Abbildung 8.** Die Zeitreihen der elfjährigen Sonnenaktivität, hier dargestellt durch die Jahresmittel des Radioflusses bei 10,7 cm, und der dreijährig gleitend gemittelten 30hPa-Höhen bei 30°N/150°W zeigen einen deutlichen Zusammenhang zwischen dem Sonnenzyklus und den Verhältnissen in der Stratosphäre der Erde (Labitzke, S. 150).

zu 0.2%, insgesamt nimmt sie aber überraschenderweise von Fleckenminimum zu Fleckenmaximum um 0.1% zu. Die Sonne ist also im Mittel heller, wenn sie mehr dunkle Sonnenflecken zeigt! Für das scheinbare Paradoxon sind besonders intensiv strahlende Regionen verantwortlich, welche die Sonnenflecken umgeben. Diese hellen „Fackelgebiete“ überwiegen über die dunklen Sonnenflecken, so dass die Sonne im Aktivitätsmaximum heller ist als im Minimum.

Können diese doch recht geringen Helligkeitsschwankungen der Sonne für das Erdklima bedeutsam sein? Zunächst einmal wüsste man natürlich gerne, wie sich die Gesamtstrahlung der Sonne in den letzten 100 Jahren entwickelt hat, um dies mit den Klimadaten zu vergleichen. Aus der Zeit vor 1978 gibt es aber keine direkten Messungen, so dass man die

Helligkeit aus den Aufzeichnungen über Sonnenflecken und Fackelgebiete, die in den Archiven der Sonnenforscher liegen, näherungsweise rekonstruieren muss. Auf diese Weise gelang es, die Variation der „Solarkonstanten“ für die letzten 100 Jahre abzuschätzen. Man fand von 1900 bis 1940 einen Anstieg um 0.2% an, danach einen gleichbleibenden Wert bis 1970, gefolgt von einem erneuten, aber nur leichten Anstieg bis heute. Bis 1970 ist dieser Verlauf grundsätzlich in guter Übereinstimmung mit der langfristigen Variation der mittleren Temperatur auf der Erde, ein Hinweis darauf, dass die Sonne unser Klima mitbestimmen könnte. Ab 1970 nimmt die Erdtemperatur stetig zu, während die solaren Parameter stagnieren; die Sonne kann also nicht für den jüngsten

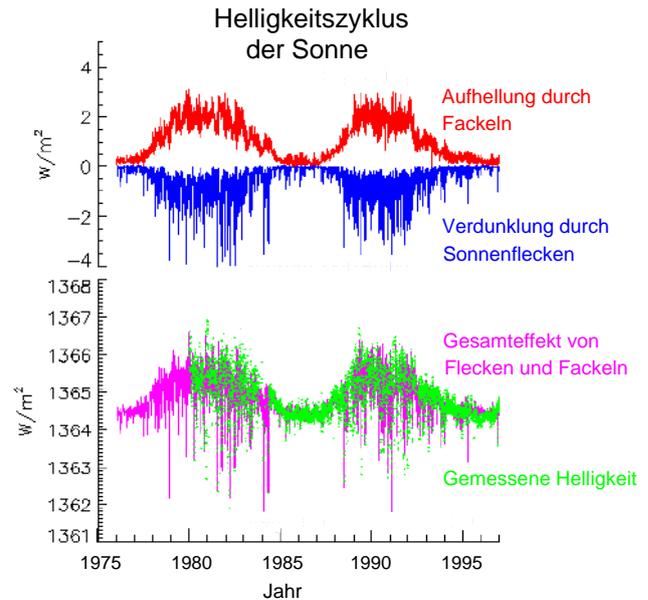


**Abbildung 9.** John Eddy wies um 1970 erstmals auf die Zusammenhänge zwischen den niedrigen Temperaturen im 17. Jahrhundert und dem Fehlen von Sonnenflecken sowie der erhöhten Konzentration von  $^{14}\text{C}$  in Baumringen hin. Mit Hilfe des radioaktiven Kohlenstoffisotops kann die solare Aktivität weiter in die Vergangenheit zurückverfolgt werden. Wegen der langen Aufenthaltszeiten von  $^{14}\text{C}$  in der Atmosphäre sieht man jedoch nicht die einzelnen 11-Jahres-Zyklen, sondern nur die langfristigen Trends, quasi als Einhüllende des Fleckenzyklus. Die Buchstaben kennzeichnen das mittelalterliche Maximum (a), das Wolf-Minimum (b), das Spörer-Minimum (c), das Maunder-Minimum (d), das Dalton-Minimum (e) sowie das gegenwärtige Maximum (f). Eine moderne Rekonstruktion der globalen Erdtemperatur in den letzten 1000 Jahren, hier einem Tiefpassfilter unterworfen, zeigt deutliche Korrelationen zwischen der Sonnenaktivität und dem Erdklima (J. Eddy, 1976, *Science* 192, 1189;  $^{14}\text{C}$ : M. Stuiver and P.D. Quay, 1980, *Science* 207, 11; Temperaturrekonstruktion: M.E. Mann, R.S. Bradley, M.K. Hughes, 1999, *Geophysical Research Letters* 26, 759).

Temperaturanstieg verantwortlich sein. Für die „fleckelose“ zweite Hälfte des 17. Jahrhunderts ergaben weitere Studien eine gegenüber heute um bis zu 0.5% geringere Strahlungsleistung der Sonne.

Um die Wirkung der gemessenen Helligkeitsschwankungen zu untersuchen, wurden sie in die aufwendigen Programme eingebaut, mit deren Hilfe die Klimaforscher das Klimageschehen auf dem Computer simulieren. Solche Rechnungen ergeben, dass der direkte Einfluss der Sonne etwa ein Drittel des Temperaturanstiegs in den letzten 100 Jahren erklärt, während der grössere Teil auf den Treibhauseffekt zurückgeführt wird. Andererseits sind auch die numerischen Modelle, welche zwangsläufig das komplexe Klimageschehen teilweise drastisch vereinfachen müssen, nicht über jeden Zweifel erhaben. So ist etwa die Stagnation des Temperaturanstiegs zwischen 1940 und 1970 trotz erhöhtem Ausstoß von Kohlendioxid nur schwer mit dem Treibhauseffekt in Einklang zu bringen, passt aber sehr gut mit dem Verlauf der Sonnenaktivität zusammen. Insgesamt legen diese Modellrechnungen den Schluss nahe, dass die Variabilität der Sonnenstrahlung zwar einen durchaus nennenswerten Einfluss auf die Klimaveränderung im letzten Jahrhundert hatte, dass aber zumindest in den letzten Jahrzehnten der Treibhauseffekt zu dominieren scheint.

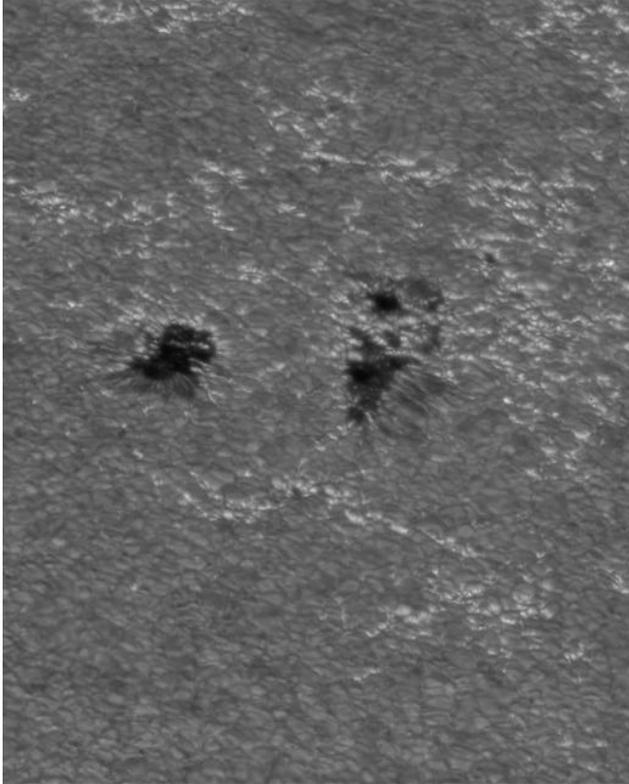
Es gibt aber ausser der direkten Wirkung der veränderlichen Gesamtstrahlung auch eine Reihe von eher indirekten Effekten, mittels derer die Sonnenaktivität das Klima



**Abbildung 10.** Helligkeitsschwankungen der Sonne im Aktivitätszyklus. Im unteren Diagramm ist die gemessene Gesamthelligkeit der Sonne während zweier Zyklen wiedergegeben, im oberen Teil sind die Beiträge von hellen Fackeln und dunklen Sonnenflecken getrennt dargestellt. Die Fackeln überwiegen die Sonnenflecken, so dass die Sonne im Aktivitätsmaximum um 0.1% heller ist als im Minimum. Während der Maxima schwankt die Helligkeit aufgrund der häufig auftauchenden und verschwindenden Sonnenflecken besonders stark (J. Lean and C. Fröhlich, 1998, in K.S. Balasubramaniam, J.W. Harvey and D.M. Rabin (Eds.), *Synoptic Solar Physics*, ASP Conference Series).

beeinflussen kann. Einer davon betrifft die Rolle von Wolken. Henrik Svensmark und Eigil Friis-Christensen stellten zwischen dem solaren Aktivitätsminimum in 1987 und dem Maximum in 1990 einen Rückgang der globalen Wolkenbedeckung um 3% fest. Da Wolken das einfallende Sonnenlicht reflektieren, bewirkt eine Abnahme von Wolken in der unteren Atmosphäre einen Temperaturanstieg. Die beiden Forscher stellten die Hypothese auf, dass die Sonnenaktivität auf dem Umweg über die kosmische Strahlung Einfluss auf die Wolkenbildung und damit auf das Klima nimmt. Die energiereichen Teilchen der kosmischen Strahlung erzeugen „Keime“, an denen Wasserdampf kondensieren und Wolken bilden kann. Ist die Sonne sehr aktiv, verringert sich wegen der magnetischen Abschirmung im interplanetaren Raum die kosmische Strahlung, damit bilden sich weniger Wolken und die Temperatur steigt an. Bei geringer Sonnenaktivität kommt es entsprechend zu einer Abkühlung. Auf diesem Wege könnte die Sonne einen erheblich größeren Beitrag zur Erwärmung der Erde in den letzten 100 Jahren geleistet haben, als man es von der Erhöhung der Strahlungsleistung alleine erwarten würde. Die Physik der Wolken und ihrer Wirkung auf das Klimageschehen ist aber sehr komplex, so dass es nicht verwunderlich ist, dass diese Hypothese durchaus umstritten ist und auch andere Mechanismen diskutiert werden.

In diesem Zusammenhang ist die langfristige Entwick-

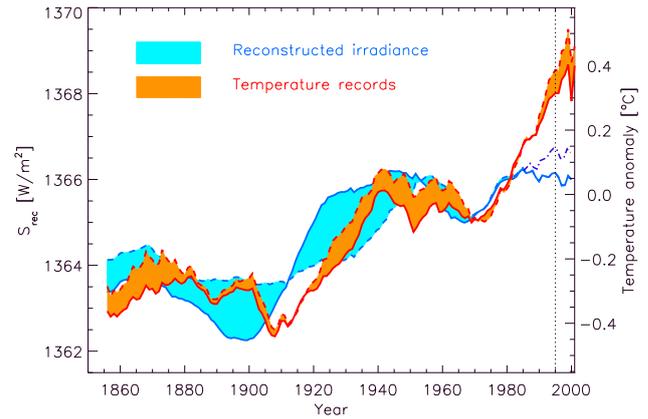


**Abbildung 11.** In der Umgebung der dunklen Sonnenflecken findet man helle Fackelgebiete. Beide Phänomene werden durch starke Magnetfelder auf der Sonnenoberfläche bewirkt. In den großen Flecken behindert das Magnetfeld den Energietransport durch Strömungen aus dem Sonneninnern, wodurch sie kühler sind und dunkel erscheinen. Fackelgebiete dagegen bestehen aus vielen kleinen Magnetfeldkonzentrationen, die durch Strahlung geheizt werden und hell erscheinen. Flecken und Fackeln tragen zur Veränderlichkeit der Gesamtstrahlung im Verlaufe des 11-Jahres-Zyklus bei (G. Scharmer, Stockholm).

lung des interplanetaren Magnetfelds von Bedeutung. Hier ergeben neuere Studien eine Verdoppelung des magnetischen Flusses in den letzten 100 Jahren, die auf die solare Aktivität zurückgeführt werden konnte. Damit im Einklang ist die beobachtete Abnahme der Konzentration von  $^{10}\text{Be}$ , einem radioaktiven Isotop, das ähnlich wie  $^{14}\text{C}$  durch kosmische Strahlung gebildet wird und ein (antikorreliertes) Maß für die Sonnenaktivität darstellt. Ein stärkeres interplanetarisches Magnetfeld bedeutet weniger kosmische Strahlung, damit möglicherweise weniger Wolkenbildung und wärmeres Klima.

Ein weiterer Weg, auf dem die Sonne möglicherweise Einfluss auf das Klimageschehen nehmen kann, ist die erhöhte Bildung von Ozon in der Stratosphäre durch die verstärkte ultraviolette Strahlung bei erhöhter Sonnenaktivität. Das Ozon wiederum absorbiert andere Bereiche des ultravioletten Lichtes und heizt so die Stratosphäre. Klimamodelle, die diesen Effekt berücksichtigen, reproduzieren qualitativ die von Karin Labitzke und Mitarbeitern gefundenen Schwankungen der atmosphärischen Zirkulation im Rhythmus des Sonnenzyklus.

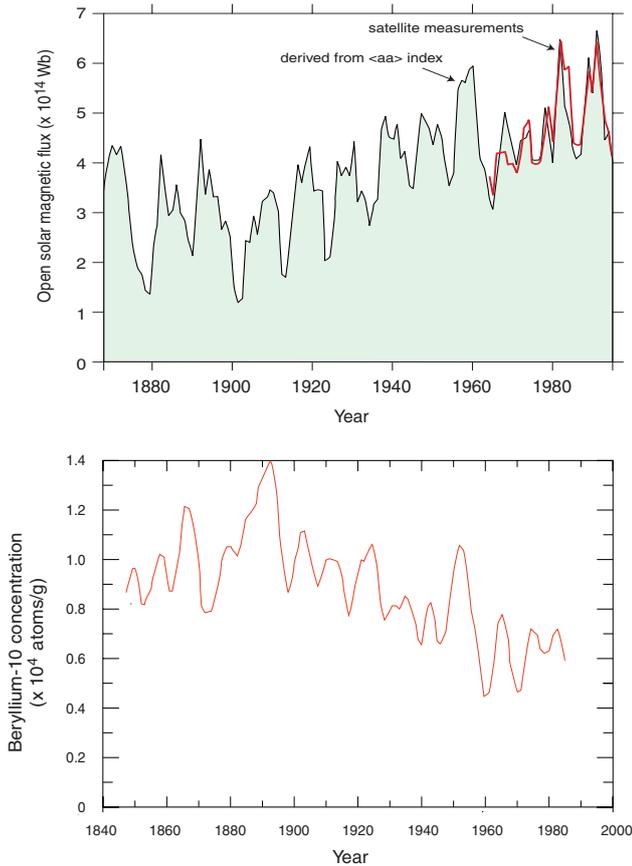
Obwohl noch viele Fragen offen sind, scheint die Sonne



**Abbildung 12.** Der Verlauf der mittleren Temperatur auf der Erde (rot) stimmt von 1860 bis 1970 gut mit der rekonstruierten solaren Helligkeit (blau) überein. Die roten und blauen Flächen zeigen unterschiedliche Temperaturmittelungen bzw. deuten die Unsicherheiten in der Bestimmung der Sonnenhelligkeit an. Der deutliche Temperaturanstieg auf der Erde seit 1970 lässt sich nicht mehr auf die Sonnenhelligkeit zurückführen und ist ein Indiz für den anthropogenen Treibhauseffekt (S.K. Solanki, M. Fligge, N. Krivova, 2002, Preprint).

beim globalen Temperaturanstieg im letzten Jahrhundert zumindest ein Stück weit im Spiel zu sein. Man würde deshalb gerne wissen, was wir in Zukunft von ihr zu erwarten haben. Wir verstehen die Sonne und ihre Aktivität immer noch viel zu wenig, um Vorhersagen machen zu können. Allerdings haben die Sonnenphysiker gegenüber den Klimaforschern einen Vorteil: wir kennen bisher nur einen Planeten wie die Erde, aber sehr viele Sterne, die der Sonne ähnlich sind. Man kann solche Sterne beobachten, um zu erforschen, was wir möglicherweise von der Sonne zu erwarten haben. Es zeigt sich ein überraschendes Ergebnis: Sterne mit einem vergleichbaren Maß an Aktivität wie die Sonne zeigen fast durchweg wesentlich stärkere Helligkeitsvariationen im Verlauf ihres Aktivitätszyklus als die Sonne. Ist die Sonne ein aussergewöhnlicher Stern oder durchläuft sie gerade eine Phase, in der ihre Helligkeit recht schwach variiert? Spiegeln die Kapriolen des Klimas in der Erdgeschichte eine sehr viel stärker veränderliche Sonne wieder?

Fassen wir den heutigen Kenntnisstand zusammen. Der 11-jährige Aktivitätszyklus der Sonne taucht da und dort, mal mehr und mal weniger deutlich in den verschiedenen Klimadaten auf, global gesehen scheinen jedoch andere Einflüsse von größerer Bedeutung. Über längere Zeiträume hinweg jedoch deuten die Daten auf einen merklichen Einfluss der veränderlichen Sonne auf das Klimageschehen hin, auch wenn dessen genaues Ausmaß und die Wirkungsmechanismen selbst noch unklar sind. Die Frage, wer denn nun der Verursacher der globalen Erwärmung der letzten hundert Jahre ist, Sonne oder Kohlendioxid, ist vermutlich falsch gestellt: beide „Verdächtige“ scheinen die Hand im Spiel zu haben. Wir können allerdings ziemlich sicher sein, dass bei weiter zunehmenden Emissionen von Kohlendioxid der Treibhauseffekt die Überhand gewinnt und es gibt gute Hinweise dafür, dass dies seit etwa 1970 bereits geschehen

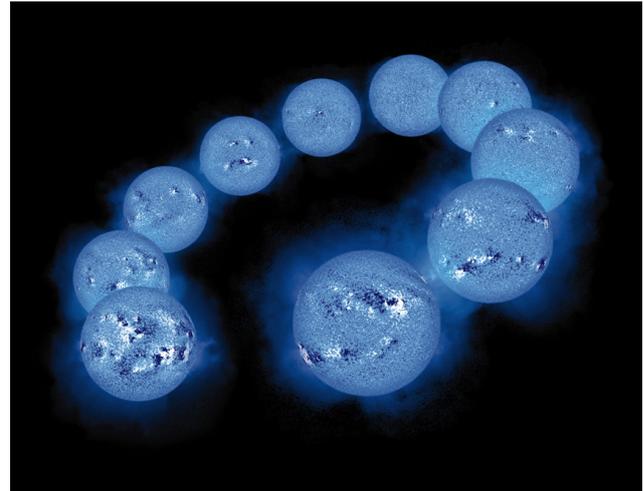


**Abbildung 13.** Im oberen Teilbild ist der magnetische Fluss im interplanetaren Raum von 1868 bis 1996 dargestellt. Er wurde aus erdmagnetischen Aktivitätsindizes gewonnen, von 1964 an bestätigt durch direkte Satellitendaten. Der elfjährigen zyklischen Variation überlagert ist eine Verdoppelung der Stärke des interplanetaren Magnetfelds in den letzten 100 Jahren. Ein ähnliches Bild ergibt sich für den gesamten magnetischen Fluss der Sonne, der aufgrund von Sonnenfleckendaten von 1610 an rekonstruiert wurde. Das zunehmende Magnetfeld führt zur vermehrten Abschirmung der kosmischen Strahlung und einer Abnahme der Konzentration von <sup>10</sup>Be, dessen Variation im Verlauf der Jahre aus grönländischen Eisbohrkernen gewonnen wurde (unteres Teilbild) (M. Lockwood, R. Stamper, M.N. Wild, 1999, Nature, 437; S.K. Solanki, M. Schüssler, M. Fligge, 2002, Astronomy and Astrophysics; J. Beer, G.M. Raisbeck, F. Yiou, 1991, in The Sun in Time).

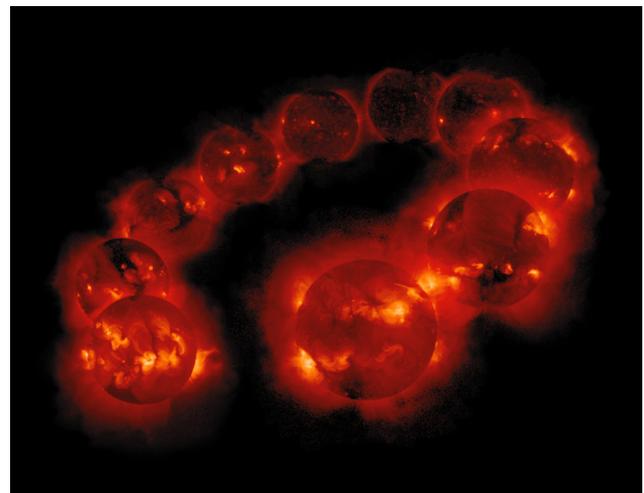
ist. Aber wir dürfen die Wirkung der Sonnenaktivität nicht aus dem Auge verlieren; auch wenn wir die Sonne nicht beeinflussen können, müssen wir doch die Ursachen ihrer Veränderlichkeit und ihren Einfluss auf das Klima besser verstehen lernen, um zu wissen, was wir in Zukunft möglicherweise von ihr zu erwarten haben.

**Die physikalische Natur des Aktivitätszyklus**

Anfang des 20. Jahrhunderts entdeckte der amerikanische Astronom George Hale, dass Sonnenflecken stark magnetisierte Gebiete auf der Sonnenoberfläche sind. Die mit Hilfe des Zeeman-Effektes von Spektrallinien gemessenen

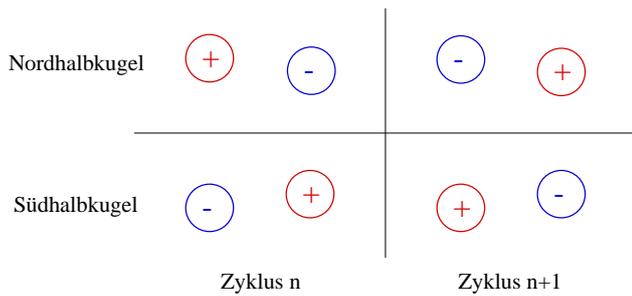


**Abbildung 14.** Das Magnetfeld der Sonne zwischen 1992 (links) über 1996 (hinten) bis 1999 (rechts). Die beiden Polaritäten des Magnetfelds sind auf blauem Hintergrund als dunkelblau bis schwarz und als hellblau bis weiss dargestellt. Deutlich zu sehen ist die Variation der Stärke des Magnetfelds vom abnehmenden letzten Zyklus zum zunehmenden neuen Zyklus. Ferner fallen die unterschiedlichen Polaritäten zwischen Nord- und Südhalbkugel sowie zwischen den beiden Zyklen auf. Siehe dazu auch den Kasten „Die physikalische Natur des Aktivitätszyklus“ (National Solar Observatory, Kitt Peak, Arizona).

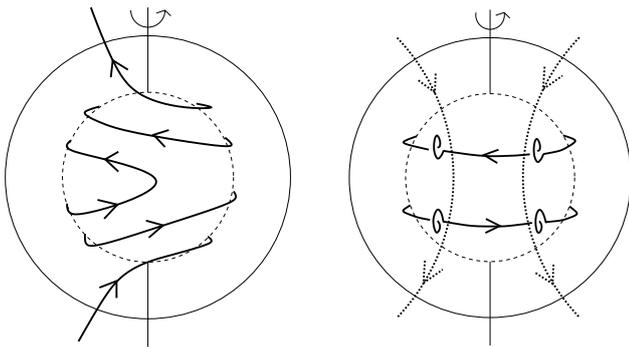


**Abbildung 15.** Die Sonne im Röntgenlicht im gleichen Zeitraum, aufgenommen vom japanischen Satelliten Yokhoh. Im Gegensatz zur geringen Veränderung der Gesamthelligkeit schwankt die Röntgenstrahlung der Sonne im Verlauf des Aktivitätszyklus um einen Faktor 100. Die Röntgenstrahlung stammt aus der heißen Korona, sie trägt aber verschwindend wenig zur Gesamtstrahlung der Sonne bei (Lockheed Martin Solar and Astrophysics Laboratory, Palo Alto, California).

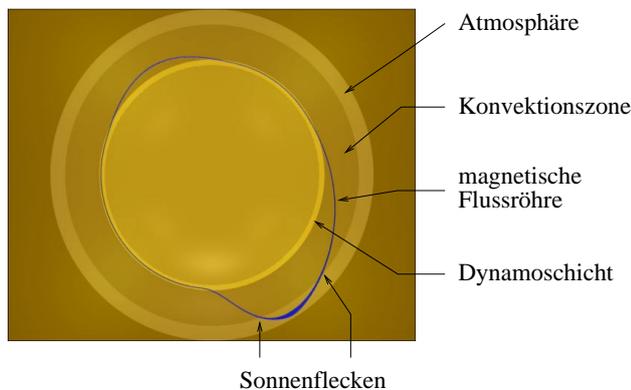
Feldstärken übertreffen das Erdmagnetfeld um das Zehntausendfache. Wenig später fand man, dass die Richtung der Magnetfeldlinien in den meist paarweise auftretenden Sonnenflecken unterschiedlich ist, in einem treten sie aus der Sonne aus, im anderen in sie ein. Die Fleckenpaare sind dabei bevorzugt in ost-westlicher Richtung auf der Sonne angeord-



**Abbildung 16.** Polaritätsregeln.



**Abbildung 17.** Dynamo (M. Ossendrijver, Kiepenheuer-Institut für Sonnenphysik, Freiburg).



**Abbildung 18.** Flussröhrenaufstieg im Äquatorschnitt (P. Caligari, Kiepenheuer-Institut für Sonnenphysik, Freiburg).

net. Ihre Polaritätsmuster sind während eines Zyklus und auf der Nordhalbkugel stets gleich, also hat beispielsweise der östliche Fleck positive und der westliche Fleck negative Polarität. In der Südhalbkugel ist diese Reihenfolge aber gerade umgekehrt. Im nachfolgenden Sonnenfleckenzyklus kehren sich die Polaritäten um, so dass dem elfjährigen Fleckenzyklus folglich ein 22jähriger magnetischer Zyklus zugrunde liegt.

Das Magnetfeld wird im unteren Bereich der Konvektionszone der Sonne durch komplexe Bewegungen des leitfähigen Plasmas nach dem Prinzip eines selbsterregten Dynamos induziert. Durch differentielle Rotation (die Sonne rotiert in ihrer Äquatorregion um etwa 30% schneller als an den Polen) wird aus einem Dipolfeld ein starkes azimuthales (d.h. entlang den Rotationsbewegungen ausgerichtetes) Magnetfeld „aufgewickelt“, das in der Nord- und Südhalbkugel entgegengesetzt gerichtet ist (linkes Teilbild). Durch die Rotation der Sonne erhalten die konvektiven Bewegungen in der Sonne einen bevorzugten Schraubensinn (ähnlich zu Zyklo- nen und Antizyklo- nen in der Erdatmosphäre); die überlagerte Wirkung einer Vielzahl solcher helikalen Strömungen auf das azimuthale Magnetfeld führt auf ein Dipolfeld mit einer gegenüber dem anfänglichen Feld umgekehrten Feldrichtung (rechtes Teilbild). Die ursprüngliche Dipolpolarität wird erst nach einer erneuten Umpolung in einem weiteren 11-Jahres-Zyklus erreicht, so dass es zu einem 22jährigen magnetischen Zyklus kommt.

Wenn das azimuthale Feld stark genug ist, verliert es sein Gleichgewicht und Bündel von Feldlinien brechen zur Oberfläche hin aus. Dort entsteht ein Paar von Sonnenflecken mit entgegengesetzter magnetischer Polarität. Die Magnetfeldlinien zwischen den Sonnenflecken reichen in weiten Bögen bis hoch in die Korona.

#### Literaturhinweise

Eigil Friis-Christensen, Claus Fröhlich, Joanna D. Haigh, Manfred Schüssler, Rudolf von Steiger (Hrsg.), Solar Variability and Climate, Space Science Reviews, 94, 2000

Douglas V. Hoyt, Kenneth H. Schatten, The Role of the Sun in Climate Change, Oxford University Press, 1997

Karin G. Labitzke, Die Stratosphäre: Phänomene, Geschichte, Relevanz, Springer, 1999

Judith Lean, The Sun's Variable Radiation and its Relevance for Earth, Annu. Rev. Astron. Astrophys. 35, 33 (1997)

National Research Council, Solar Influences on Global Change, Washington, 1994

Elizabeth Nesme-Ribes (Hrsg.), The Solar Engine and its Influence on Terrestrial Atmosphere and Climate, Springer, 1994

Judit M. Pap, Claus Fröhlich, Hugh S. Hudson, Sami K. Solanki (Hrsg.), The Sun as a Variable Star, Cambridge University Press, 1995

Charles P. Sonett, Mark S. Giampapa, Mildred S. Matthews (Eds.), The Sun in Time, The University of Arizona Press, 1991