

Der Einfluss der Sonne auf das Erdklima

Auf der Erde ist es in den vergangenen 100 Jahren im Mittel ein knappes Grad Celsius wärmer geworden. Diese Erwärmung vollzog sich in zwei Etappen. In der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts stieg die Temperatur um gut 0,4 Grad an, blieb dann zwischen 1940 und 1970 in etwa konstant, um seitdem wiederum um etwa 0,5 Grad anzusteigen (Abbildung A). Zwar sind solche Temperaturschwankungen nicht ungewöhnlich, einen so rapiden Anstieg wie in den letzten 30 Jahren hat es jedoch seit 1000 Jahren nicht gegeben.

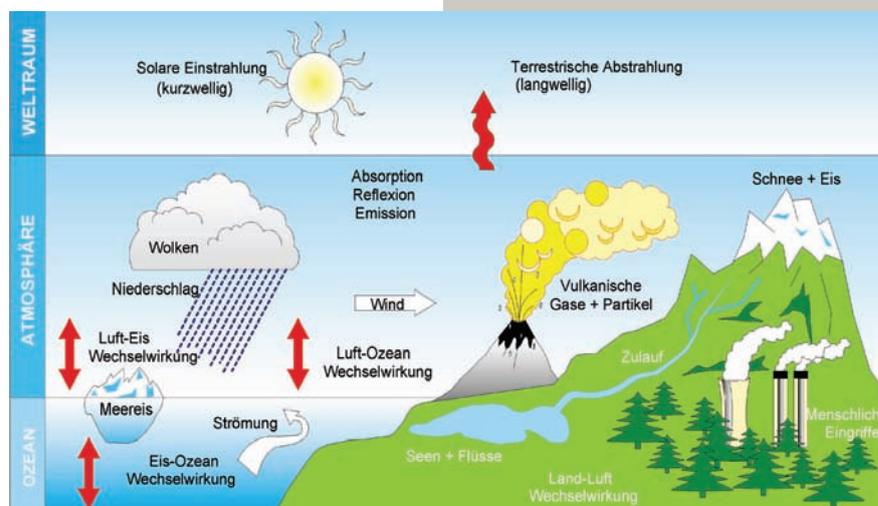
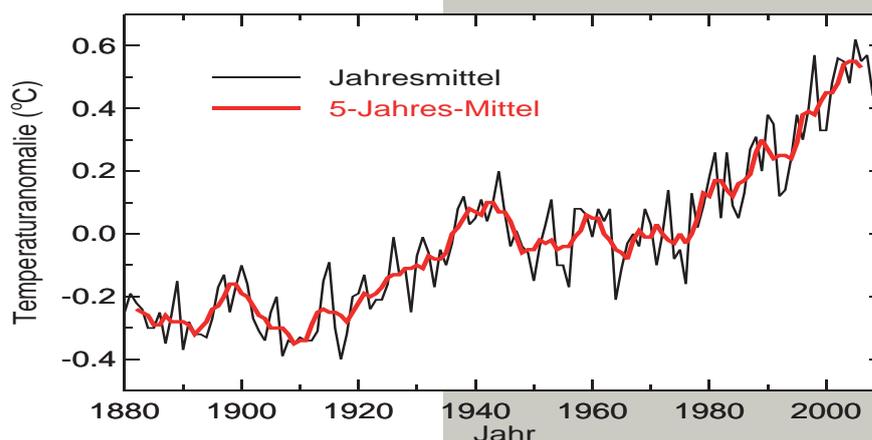
Wie viel hat dazu die Freisetzung von Kohlendioxid aus fossilen Brennstoffen (Kohle, Erdgas und Erdöl) beigetragen? Die Konzentration dieses „Treibhausgases“ in der Atmosphäre ist seit Beginn der Industrialisierung Mitte des 18. Jahrhunderts um 30% angestiegen, am stärksten in den letzten Jahrzehnten. Aber es ist nicht einfach, die dadurch bedingte Erwärmung von den natürlichen Ursachen für Klimaschwankungen wie der allgemeinen Variabilität des Klimasystems, dem Vulkanismus und nicht zuletzt der Sonne abzugrenzen.

Die Sonne strahlt ihre Energie in einem breiten Bereich von Wellenlängen ab. Das Maximum ihrer Strahlung liegt im sichtbaren Licht. Die verschiedenen Wellenlängen werden in unterschiedlichen Höhen in der Erdatmosphäre absorbiert. Röntgenstrahlung wird in der hohen Atmosphäre um 100 km zurückgehalten, die ultraviolette (UV) Strahlung zum größten Teil in der Ozonschicht der Stratosphäre zwischen 10 und 50 km Höhe. Das sichtbare Licht und die Radiostrahlung erreichen den Erdboden.

Die Einstrahlung der Sonne ist die Energiequelle für das Wettergeschehen (Abbildung B). Jede mittel- und längerfristige Schwankung ihres gesamten Strahlungsflusses kann daher für die Klimaentwicklung von Bedeutung sein. Darüber hinaus können Änderungen im solaren Spektrum, insbesondere der

UV-Strahlung, diesen Einfluss durch ihre Auswirkung auf die Bildung und den Abbau von Ozon in der Stratosphäre verstärken. Schließlich kann die Sonne auch auf indirekte Art auf das Erdklima einwirken, z.B. über die mit dem Magnetfeld der Sonne schwankende Intensität der kosmischen Strahlung, die sich wiederum möglicherweise auf die Bildung von Wolken auswirkt. Da Wolken das einfallende Sonnenlicht reflektieren, bewirkt eine Abnahme von Wolken in der unteren Atmosphäre einen Temperaturanstieg.

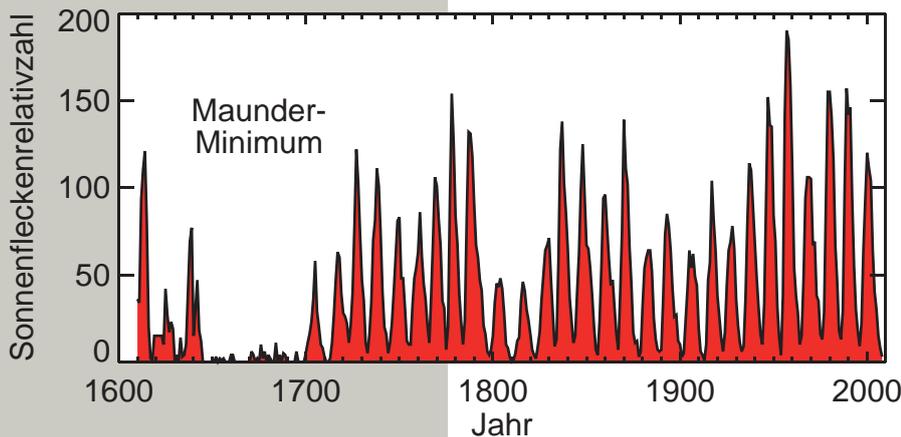
A Entwicklung der mittleren Temperatur auf der Erde seit 1880 nach Daten des NASA Goddard Institute for Space Studies.



B Das Klima wird bestimmt durch die schwankende Sonneneinstrahlung, durch Winde und Meeresströmungen und deren komplexe Wechselwirkung mit der Litho- und Biosphäre. (Grafik: MPI für Meteorologie, Hamburg)

Sonnenaktivität und Erdtemperatur

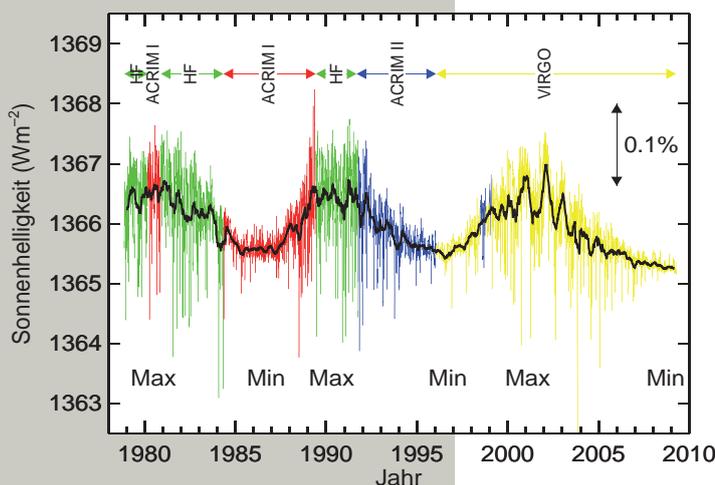
C Sonnenfleckenzahl seit dem Beginn der regelmäßigen Aufzeichnungen zu Beginn des 17. Jahrhunderts. Die Zahl der Sonnenflecken variiert in einem Zyklus von etwa elf Jahren, der von längerfristigen Schwankungen überlagert wird. Im „Maunder-Minimum“ in der zweiten Hälfte des 17. Jahrhunderts gab es fast keine Sonnenflecken.



Alle genannten Mechanismen, durch die die Sonne einen Einfluss auf das Erdklima ausüben könnte, hängen eng mit Schwankungen im Magnetfeld der Sonne und den damit einhergehenden Änderungen in der Sonnenaktivität zusammen. Besonders auffällig ist der etwa elfjährige Zyklus (Abbildung C), der sich beispielsweise in der Anzahl

der dunklen Sonnenflecken zeigt. Dies sind Gebiete auf der Sonnenoberfläche, in denen ein starkes Magnetfeld (einige tausend mal so stark wie das Magnetfeld der Erde) den Energietransport aus dem Sonneninnern behindert. Die einzelnen Aktivitätszyklen der Sonne schwanken in ihrer Stärke und auch in ihrer Länge. Manchmal verschwinden die Sonnenflecken auch fast vollständig über längere Zeit, so beispielsweise während des so genannten „Maunder Minimums“ in der zweiten Hälfte

des 17. Jahrhunderts.



D Schwankung der Gesamt-Einstrahlung der Sonne oberhalb der Erdatmosphäre (Daten von vier verschiedenen Satelliten). Die Messzeit umfasst drei Sonnenfleckenmaxima (1980, 1990, 2001) und drei Minima (1987, 1997, 2009). Die Variation der Sonneneinstrahlung verläuft parallel zum Sonnenfleckenzyklus. Die kurzfristigen „Einbrüche“ werden durch das Auftauchen großer Sonnenflecken hervorgerufen (Datenquelle: PMOD, Davos).

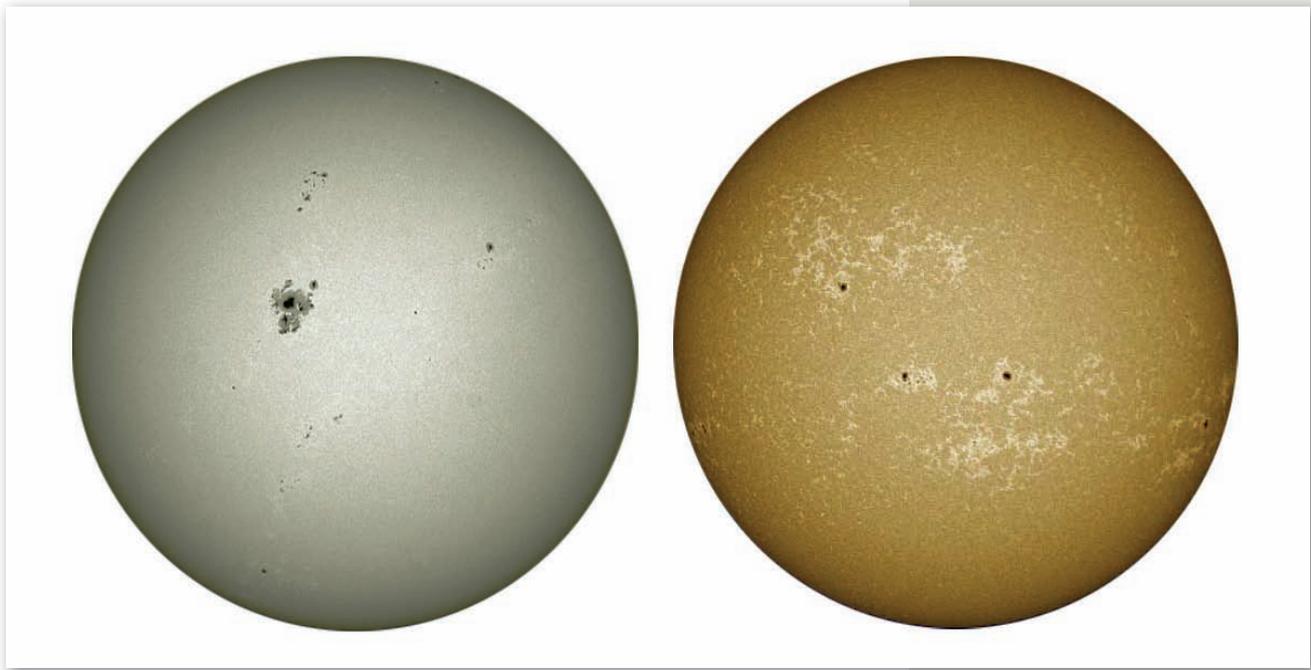
Die Aufzeichnung der Anzahl von Sonnenflecken und anderer Indikatoren der Sonnenaktivität können mit Klimaaufzeichnungen verglichen werden. Längerfristige Klimaschwankungen laufen teilweise parallel zu entsprechenden Variationen der Sonnenaktivität. So fielen das Maunder-Minimum und eine

ähnliche Periode geringer Sonnenaktivität im 16. Jahrhundert mit der so genannten kleinen Eiszeit in Europa zusammen. In den strengen Wintern dieser Zeit gefror die Themse regelmäßig und die alpinen Gletscher wuchsen weit in die Täler hinein. Dagegen gab es im 12. Jahrhundert eine Zeit erhöhter Sonnenaktivität, zeitgleich mit Berichten über ein ausgeprägt warmes Klima, das es den Wikingern ermöglichte, Siedlungen in Grönland zu unterhalten.

Messungen der Sonneneinstrahlung

In den letzten Jahrzehnten konnten die Schwankungen der Helligkeit und des Magnetfeldes der Sonne durch Messungen von Satelliten aus präzise verfolgt werden. So wurde gefunden, dass die Sonne in fleckenreichen Jahren erheblich mehr ultraviolette Strahlung als im Aktivitätsminimum abstrahlt. Gleichzeitig wird die obere Erdatmosphäre durch die Absorption dieser Strahlung erwärmt und dehnt sich deshalb im Fleckenmaximum ein gutes Stück weiter in den Weltraum aus. In der unteren Stratosphäre (oberhalb 10 km Höhe) wurden ebenfalls Temperatur- und Druckschwankungen gemessen, die im Gleichtakt mit dem Sonnenfleckenzyklus sind und möglicherweise großräumige Luftzirkulationen beeinflussen.

Überraschenderweise zeigten die Satelliten-Messungen auch, dass die totale Einstrahlung der Sonne auf die Erde im Verlauf ihres elfjährigen Aktivitätszyklus schwankt (Abbildung D). Wenn große Sonnenflecken auftauchen, verringert sich die Strahlungsleistung kurzzeitig um bis zu 0,2%, insgesamt nimmt sie aber überraschenderweise von Fleckenminimum zu Fleckenmaximum um etwa 0,1% zu. Die Sonne ist also im Mittel heller, wenn sie mehr dunkle Sonnenflecken zeigt! Für das scheinbare Paradoxon sind besonders intensiv strahlende magnetische Regionen verantwortlich, welche die Sonnenflecken umgeben. Diese hellen „Fackelgebiete“ mit kleinskaligen Magnetfeldkonzentrationen überwiegen gegenüber den dunklen Sonnenflecken, so dass die Sonne im Aktivitätsmaximum etwas heller ist als im Minimum.



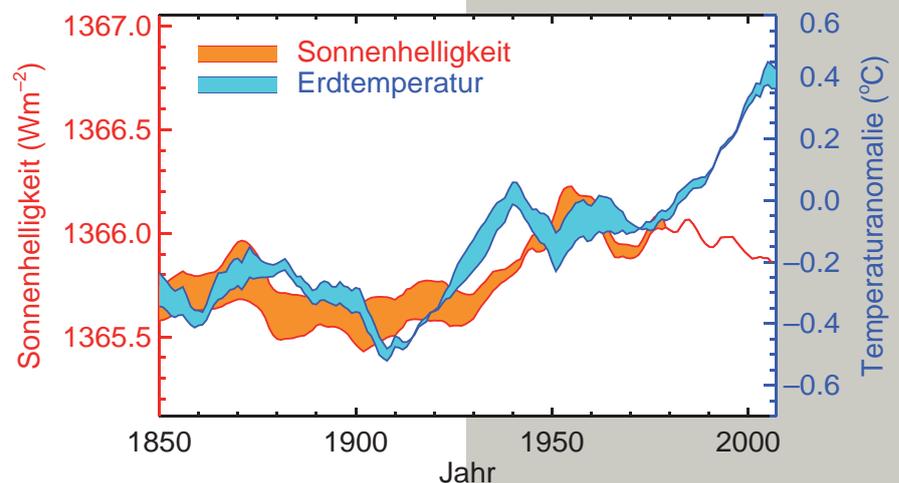
Forschung am MPS

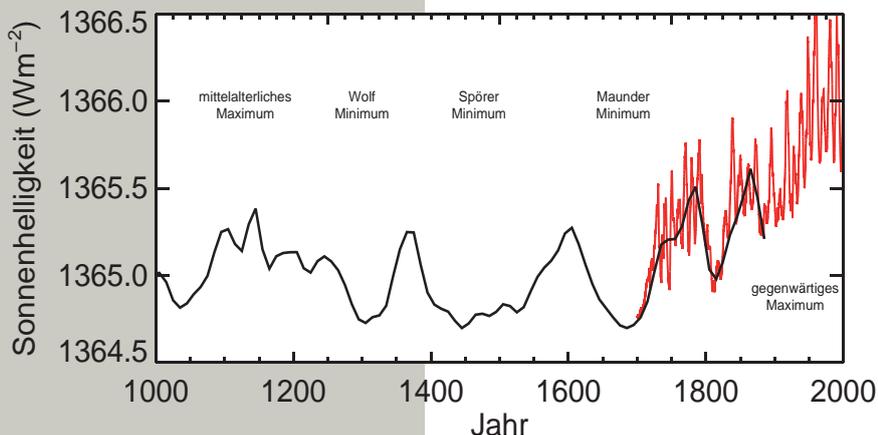
Können diese doch recht geringen Helligkeitsschwankungen der Sonne für das Erdklima bedeutsam sein? Eine rein periodische Schwankung bewirkt keine langfristige Änderung der Sonnenhelligkeit und kann somit auch keinen Beitrag zur globalen Erwärmung leisten. Dazu wäre eine systematische Änderung über die vergangenen hundert Jahre notwendig. Aus der Zeit vor 1978 gibt es aber keine direkten Messungen. Die Helligkeit muss man deshalb aus Archiv-Aufzeichnungen über Sonnenflecken und Fackelgebiete näherungsweise rekonstruieren. Auf diese Weise gelang es Forschern am MPS, die Variation der Sonnenhelligkeit für die vergangenen 100 Jahre abzuschätzen (Abbildung F). Man fand von 1900 bis 1950 einen kontinuierlichen Anstieg um 0,05%, danach einen gleichbleibenden Wert bis 1980, gefolgt von einem leichten Abfall in den vergangenen Jahrzehnten. Bis 1970 ist dieser Verlauf qualitativ in Übereinstimmung mit der langfristigen Veränderung der mittleren Temperatur auf der Erde. Ab etwa 1970 nimmt die Temperatur allerdings deutlich zu, während die solaren Parameter ab 1980 stagnieren. Die Sonne kann daher kaum für den jüngsten Temperaturanstieg verantwortlich gemacht werden. Für die „fleckelose“ zweite Hälfte des 17. Jahrhunderts ergaben Studien eine gegenüber heute längerfristig geringere Strahlungsleistung der Sonne.

Für viele Untersuchungen über die Ursachen der Sonnenaktivität und ihre mögliche Wirkung auf langfristige Schwankungen des Erdklimas ist die Zeitspanne ab dem Jahr 1610, für die systematische Aufzeichnungen von Sonnenflecken vorliegen, viel zu kurz. Für die Zeit davor kann die Sonnenaktivität aus anderen Daten abgeleitet werden. Diese Informationen sind auf der Erde in Form so genannter „kosmogener Isotope“ gespeichert. Das sind radioaktive Atome, die in der oberen Atmosphäre der Erde entstehen, wenn ein energiereiches Teilchen der kosmischen Strahlung auf ein Luftmolekül trifft. Eines dieser Isotope ist Beryllium-10 (Halbwertszeit: 1,6 Mio. Jahre), das bei Niederschlägen aus der Atmosphäre ausgewaschen wird und sich in

E Sonnenflecken und Sonnenfackeln
Links: Aufnahme der Sonne im sichtbaren Licht. Die Flecken erscheinen dunkel, weil ihre Temperatur mit ca. 4000 Grad um etwa 2000 Grad geringer als die ihrer Umgebung ist. Sonnenflecken leben typischerweise mehrere Tage bis Wochen und wandern durch die Rotation der Sonne über die sichtbare Sonnenhalbkugel.
Rechts: Aufnahme der Sonne im Licht des einfach ionisierten Kalziums. Neben den dunklen Sonnenflecken sind die ebenfalls magnetischen Fackelgebiete als helle Flächen deutlich zu sehen.

F Die mittlere Temperatur auf der Erde (blau) verläuft von 1850 bis 1970 weitgehend parallel zur rekonstruierten solaren Helligkeit (rot). Die blauen und roten Flächen deuten die Unsicherheiten in der Bestimmung der jeweiligen Größen an. Nach 1980 laufen die Trends deutlich auseinander, so dass der nachfolgende Temperaturanstieg auf der Erde nicht auf einen Einfluss der Sonne zurückzuführen ist.





G Rekonstruktion der (jeweils über zehn Jahre gemittelten) Sonnenhelligkeit aus der in Baumringen gemessenen Konzentration des radioaktiven Isotops C-14 für die vergangenen 1000 Jahre. Die Rekonstruktion endet im Jahr 1900, da die C-14 Daten danach durch Verbrennung fossiler Stoffe verfälscht sind. Die aus Sonnenfleckendaten gewonnene Sonnenhelligkeit seit 1700 (jeweils über ein Jahr gemittelt) ist rot eingezeichnet. Es zeigen sich drei große Minima und das mittelalterliche Maximum im 12. Jahrhundert. Deutlich erkennbar ist die gegenwärtige Periode hoher Sonnenaktivität.

den polaren Eisschichten schichtweise abgelagert. Ein weiteres durch kosmische Strahlung gebildetes Isotop ist C-14, ein radioaktives Kohlenstoffisotop mit einer Halbwertszeit von 5730 Jahren. Durch seinen Anteil in Baumringen kann die Produktionsrate von C-14 bis zum Ende der letzten Eiszeit zurückverfolgt werden.

Da die kosmische Strahlung durch das den interplanetaren Raum erfüllende Magnetfeld der Sonne teilweise abgeschirmt wird, schwankt die Häufigkeit des erzeugten Beryllium-10 und C-14 auf der Erde umgekehrt mit der Stärke dieses Magnetfelds. Dieses selbst wiederum steht mit der Häufigkeit von Sonnenflecken in Verbindung. Da C-14 etwa 30 Jahre in der Atmosphäre verweilt, lassen sich allerdings nicht einzelne Sonnenfleckenzyklen rekonstruieren, sondern nur langfristige Trends der Sonnenaktivität (Abbildung G).

Durch die Anwendung einer Reihe von physikalischen Modellen ist es einer Forschergruppe unter Führung des MPS gelungen, eine quantitativ zuverlässige Bestimmung der Sonnenfleckenzahl 11400 Jahre zurück in die Vergangenheit zu gewinnen. Die erweiterte Zeitreihe zeigt, dass es vor mehreren tausend Jahren eine Episode

ähnlich starker Sonnenaktivität gab wie in den vergangenen 60 Jahren (Abbildung H).

Fazit

Fassen wir den heutigen Kenntnisstand zusammen. Über längere Zeiträume hinweg deuten die Daten auf einen Einfluss der Sonne auf das Klimageschehen hin, auch wenn dessen genaues Ausmaß und die Wirkungsmechanismen selbst noch unklar sind. Bei der globalen Erwärmung der vergangenen 100 Jahre wird ebenfalls ein gewisser Beitrag der Sonne nahegelegt, allerdings hat spätestens seit etwa 1980 der verstärkte Treibhauseffekt durch die Zunahme von Kohlendioxid in der Atmosphäre die Überhand gewonnen.

Internet-Seiten

<http://www.mps.mpg.de/projects/sun-climate>

http://www.mpimet.mpg.de/ausbildung/erdsystem_intro.html

<http://www.iup.uni-heidelberg.de/institut/forschung/groups/radiokohlenstoff/index.htm>

<http://www.ncdc.noaa.gov/paleo/icecore/greenland/summit/document/gripinfo.htm>

<http://sidc.oma.be>

D. Schmitt, M. Schüssler, S. K. Solanki
Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung
Max-Planck-Straße 2
37191 Katlenburg-Lindau
<http://www.mps.mpg.de>

H Rekonstruktion der (jeweils über zehn Jahre gemittelten) Sonnenfleckenzahl seit 9400 v. Chr. basierend auf C-14 Daten. Die direkten Messungen von Sonnenflecken seit 1610 sind rot eingezeichnet.

