

Der Einfluss der Sonne auf das Erdklima

Forschungsinfo 02/2005

Einleitung

Auf der Erde ist es in den letzten 100 Jahren im Mittel ein knappes Grad Celsius wärmer geworden, wobei sich diese Erwärmung in zwei Etappen vollzog. In der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts stieg die Temperatur um gut 0.4 Grad an, blieb dann zwischen 1940 und 1970 etwa konstant, um seitdem wiederum um etwa 0.4 Grad anzusteigen (Abb. 1). Solche Temperaturschwankungen sind erdgeschichtlich nicht ungewöhnlich, der rapide Anstieg in den letzten 30 Jahren ist jedoch ohne Beispiel in den letzten 1000 Jahren.

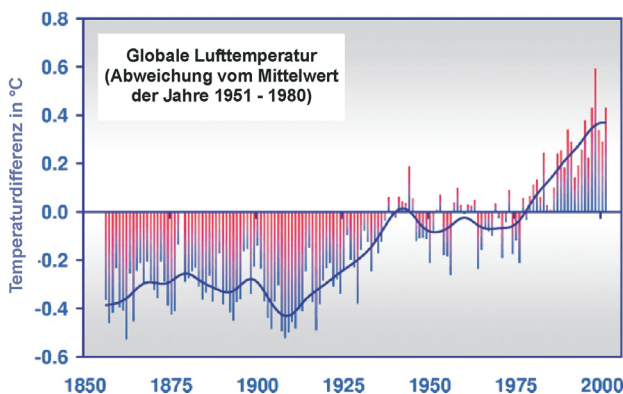


Abb. 1: Entwicklung der mittleren Temperaturen (bodennahe Lufttemperatur) auf der Erde seit 1860.

Wieviel von diesem Temperaturanstieg wurde durch die Freisetzung von Kohlendioxid durch fossile Brennstoffe (Kohle, Erdgas und Erdöl) verursacht? 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 verschiedenen Wellenlängen ab. Das Maximum ihrer Strahlung liegt im sichtbaren Licht. Die verschiedenen Wellenlängenbereiche werden in unterschiedlichen Höhen in der Erdatmosphäre absorbiert. Röntgenstrahlung wird in der hohen Atmosphäre um 100 km zurückgehalten, die UV-Strahlung zum größten Teil in der Ozonschicht

zwischen 10 und 50 km Höhe, das sichtbare Licht ebenso wie die Radiostrahlung erreichen den Erdboden.

Die Einstrahlung der Sonne ist die Energiequelle für das Wettergeschehen (Abb. 2). Jede mittel- und längerfristige Schwankung ihres gesamten Strahlungsflusses ist daher von möglicher Bedeutung für die Klimaentwicklung. 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.

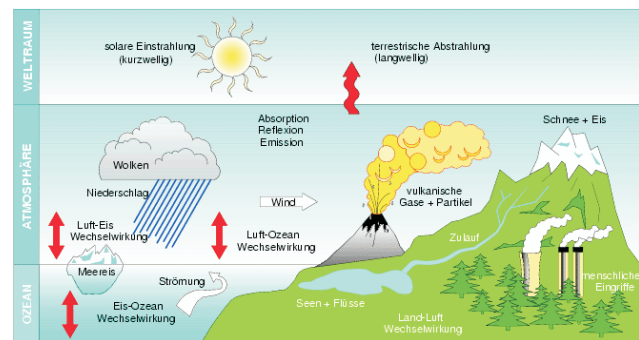


Abb. 2: Das Klima wird bestimmt durch die schwankende Einstrahlung von der Sonne, durch Winde und Meeresströmungen und deren komplexe Wechselwirkung mit der Litho- und Biosphäre (Abb.: MPI für Meteorologie, Hamburg).

Sonnenaktivität und Temperatur

Alle genannten Mechanismen, mittels derer die Sonne einen Einfluss auf das Erdklima ausüben könnte, hängen eng mit dem schwankenden Magnetfeld der Sonne und der durch das Magnetfeld hervorgerufenen Sonnenaktivität zusammen. Besonders auffällig ist dabei der etwa 11-jährige Zyklus, der sich beispielsweise in der Anzahl der jeweils sichtbaren dunklen Sonnenflecken zeigt (Abb. 5). Dies sind

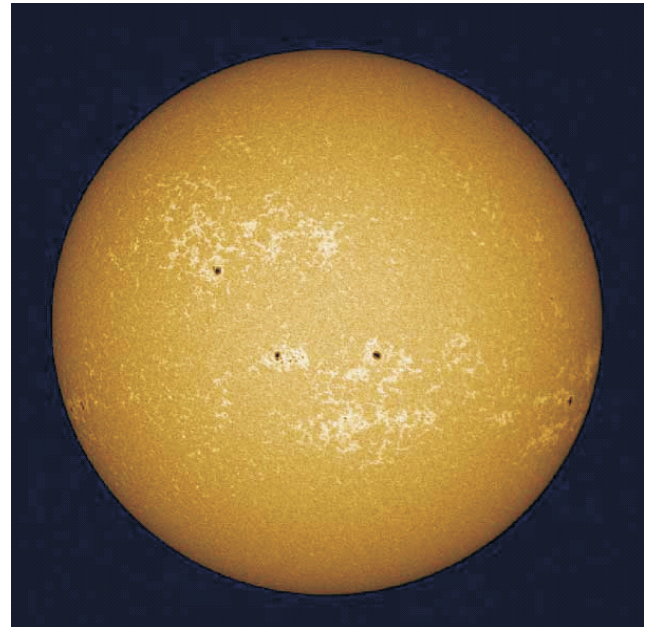
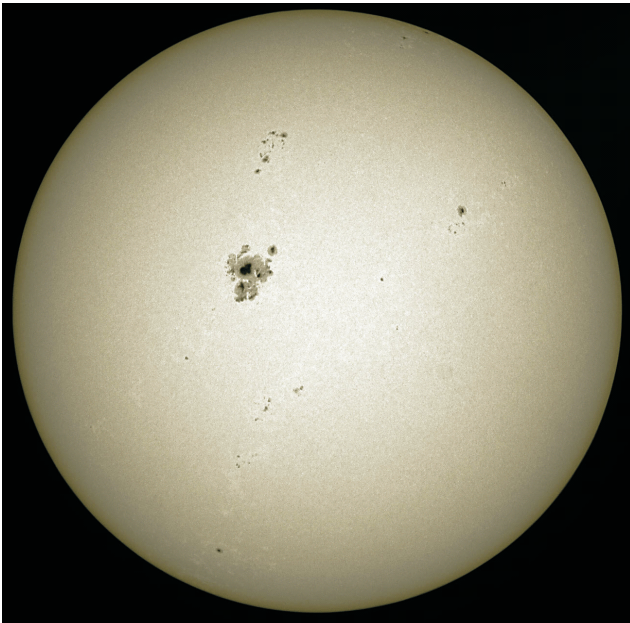


Abb. 5: Sonnenflecken und Sonnenfackeln. **Links:** Aufnahme der Sonne mit Sonnenflecken im sichtbaren Licht. Die Flecken erscheinen dunkel, weil ihre Temperatur mit ca. 4000° um etwa 2000° geringer als die ihrer Umgebung ist. Sonnenflecken leben typischerweise mehrere Tage bis Wochen und wandern durch 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.

den Wert bis 1970, gefolgt von einem erneuten, aber nur leichten Anstieg. Bis 1970 ist dieser Verlauf qualitativ in Übereinstimmung mit der langfristigen Veränderung der mittleren Temperatur auf der Erde und eilt ihr sogar etwas voraus. Dies ist ein Hinweis darauf, dass die Sonne unser Klima mitbestimmen könnte. Ab etwa 1970 nimmt die Erdtemperatur allerdings deutlich weiter 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 weitere Studien eine gegenüber heute um bis zu 0.5% 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 produziert werden, 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 den polaren Eisschilden schichtweise niederschlägt. Da die kosmische Strahlung durch das den interplanetaren Raum erfüllende Magnetfeld der Sonne teilweise abgeschirmt wird, schwankt die Häufigkeit des erzeugten Beryllium-10

auf der Erde mit der Stärke dieses Magnetfelds, das selbst wiederum mit der Häufigkeit von Sonnenflecken in Verbindung steht. Durch die Anwendung einer Reihe von physikalischen Modellen ist es einer Forschergruppe unter Führung des MPS gelungen, eine quantitativ zuverlässige Bestimmung der Sonnenfleckenzahl zurück bis zum Jahr 850 zu gewinnen (Abb. 7). Die Ergebnisse zeigen, dass sich die Sonne seit etwa 60 Jahren in einem Zustand ungewöhnlich hoher Aktivität befindet, der kein Gegenstück seit dem Jahr 850 hat.

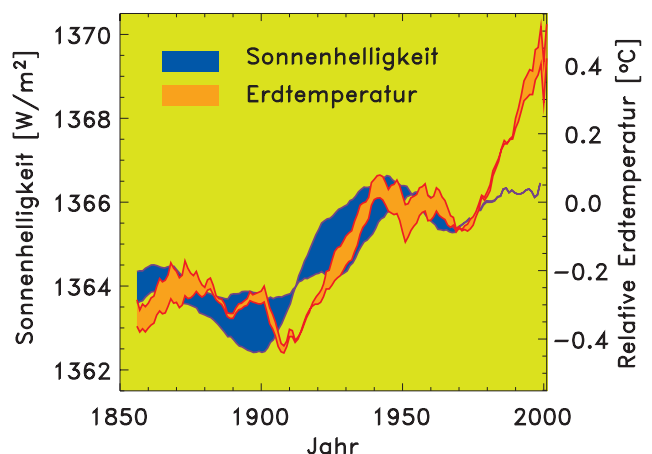


Abb. 6: Der Verlauf der mittleren Temperatur auf der Erde (orange) stimmt von 1860 bis 1970 gut mit der rekonstruierten solaren Helligkeit (blau) überein. Die roten und blauen Flächen deuten die Unsicherheiten in der Bestimmung der jeweiligen Größen an. Während die Kurven vor 1980 weitgehend parallel verlaufen, lässt sich der deutliche Temperaturanstieg auf der Erde danach kaum auf einen Einfluss der Sonne zurückführen (S.K. Solanki und N. Krivova, MPS)

Gebiete auf der Sonnenoberfläche, in denen ein starkes Magnetfeld (einige tausend mal stärker als das Magnetfeld der Erde) den Energie-transport aus dem Sonneninnern behindert. Die einzelnen Aktivitätszyklen der Sonne schwanken in ihrer Stärke und auch in ihrer Länge (Abb. 3). Zeitweise verschwinden die Sonnenflecken auch fast vollständig über längere Zeit, so beispielsweise während des sogenannten „Maunder-Minimums“ in der zweiten Hälfte des 17. Jahrhunderts.

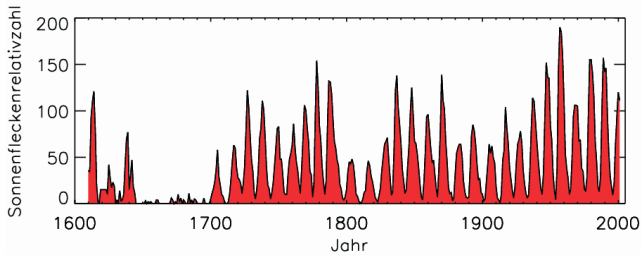


Abb. 3: Sonnenfleckenzahl seit dem Beginn der regelmäßigen Aufzeichnungen zum Beginn des 17. Jahrhunderts. Die Zahl der Sonnenflecken variiert in einem Zyklus von etwa 11 Jahren, der von längerfristigen Schwankungen überlagert wird. Im „Maunder-Minimum“ in der zweiten Hälfte des 17. Jahrhunderts gab es fast keine Sonnenflecken.

Jahrhundert. Die Zahl der Sonnenflecken variiert in einem Zyklus von etwa 11 Jahren, der von längerfristigen Schwankungen überlagert wird. Im „Maunder-Minimum“ in der zweiten Hälfte des 17. Jahrhunderts gab es fast keine Sonnenflecken.

Die Aufzeichnung der Anzahl der Sonnenflecken und anderer Indikatoren der Sonnenaktivität können mit Klimaaufzeichnungen verglichen werden. So wurde beispielsweise ein auffälliger Zusammenhang zwischen der Lufttemperatur über den Landmassen in der nördlichen Hemisphäre der Erde und der Länge der Sonnenfleckenzyklen gefunden. Auch längerfristige Klimaschwankungen in Erdbodennähe 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, einer Zeit strenger Winter, in denen die Themse regelmäßig gefror und die alpinen Gletscher weit in die Täler hinein wuchsen. Dagegen gab es eine Zeit erhöhter Sonnenaktivität im 12. und 13. Jahrhundert, 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 Sonneneinstrahlung und des Magnetfeldes der Sonne präzise verfolgt werden, wobei Messungen von Raketen und Satelliten besondere Bedeutung erlangt haben. 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 Satellitenmessungen auch, dass die totale Einstrahlung der Sonne auf die Erde im Verlauf ihres 11-jährigen Aktivitätszyklus schwankt (Abb. 4). 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 dieses scheinbare Paradoxon sind besonders intensiv strahlende magnetische Regionen verantwortlich, welche die Sonnenflecken umgeben. Diese hellen „Fackelgebiete“ überwiegen gegenüber den dunklen Sonnenflecken, so dass die Sonne im Aktivitätsmaximum heller ist als im Minimum.

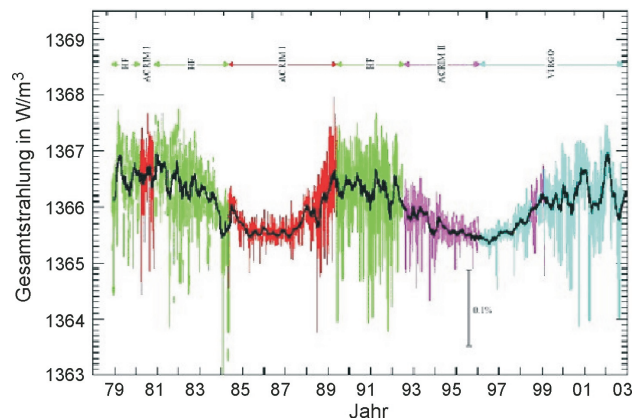


Abb. 4: Schwankung der Gesamt-Einstrahlung der Sonne oberhalb der Erdatmosphäre (Daten von vier verschiedenen Satelliten). Die Messzeit umfasst drei Sonnenfleckenmaxima (1980, 1990, 2001) und zwei Minima dazwischen. Die Variation der Sonneneinstrahlung verläuft parallel zum Sonnenfleckenzyklus. Die kurzfristigen „Einbrüche“ werden durch das Auftauchen großer Sonnenflecken hervorgerufen.

Forschung am MPS

Können diese doch recht geringen Helligkeitsschwankungen der Sonne für das Erdklima bedeutsam sein? Eine rein periodische Schwankung der Helligkeit bewirkt keine langfristige Änderung der Sonnenhelligkeit und kann somit auch keinen Beitrag zur globalen Erwärmung leisten. Dazu wäre eine systematische Änderung über die letzten hundert Jahre notwendig. 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 Forschern am MPS, die Variation der Sonnenhelligkeit für die letzten 100 Jahre abzuschätzen (Abb. 6). Man fand von 1900 bis 1940 einen Anstieg um 0.2%, danach einen gleichbleiben-

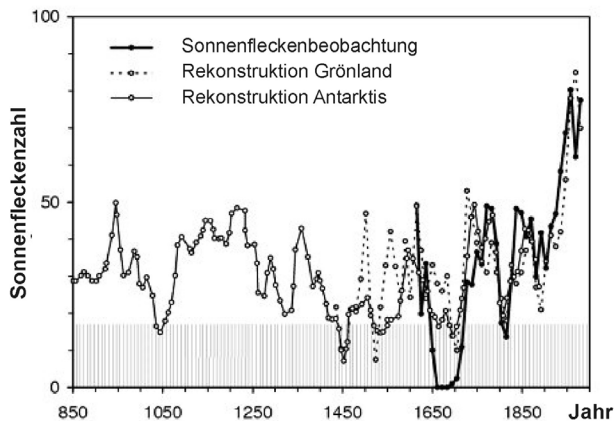


Abb. 7: Rekonstruktion der (jeweils über 10 Jahre gemittelten) Sonnenfleckenzahl aus der in Eisbohrkernen gemessenen Konzentration des radioaktiven Isotops Be-10 seit dem Jahr 850. Verglichen werden die Ergebnisse von zwei verschiedenen Bohrkernen (aus Grönland und der Antarktis) mit den direkten Beobachtungen von Sonnenflecken seit 1610. Deutlich erkennbar ist, dass die gegenwärtige Periode hoher Sonnenfleckenzahl in den letzten 1000 Jahren ohne Parallele ist.

Diese Ergebnisse wurden jüngst erweitert durch die Analyse des ebenfalls durch kosmische Strahlung gebildeten C-14 (radioaktiver Kohlenstoff mit einer Halbwertszeit von 5730 Jahren) in Baumringen. Auf diese Art kann die Produktionsrate von C-14 bis zum Ende der letzten Eiszeit zurück verfolgt werden. Die vom MPS geführte Forschergruppe hat aus diesen Daten die Zahl der Sonnenflecken über 11.400 Jahre

bestimmt (Abb. 8). Die erweiterte Zeitreihe zeigt, dass man über 8000 Jahre in die Vergangenheit zurückgehen muss, um eine Episode ähnlich starker Sonnenaktivität zu finden wie in den letzten 60 Jahren.

Fazit

Fassen wir den heutigen Kenntnisstand zusammen. Über längere Zeiträume hinweg deuten die Daten auf einen merklichen Einfluss der veränderlichen Sonne auf das Klima-geschehen hin, auch wenn dessen genaues Ausmaß und die Wirkungsmechanismen selbst noch unklar sind. Bei der globalen Erwärmung der letzten hundert Jahre wird ebenfalls ein Beitrag der Sonne nahegelegt, allerdings scheint seit 1980 der verstärkte Treibhauseffekt durch die Zunahme von Kohlendioxid in der Atmosphäre die Überhand gewonnen zu haben.

S. K. Solanki, D. Schmitt, M. Schüssler

Internet-Seiten:

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

http://www.mpimet.mpg.de/de/web/education/earth_system.html

<http://www.iup.uni-heidelberg.de/institut/forschung/groups/fa/radiokohlenstoff/radiometrie-web.html>

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

<http://sidc.oma.be>

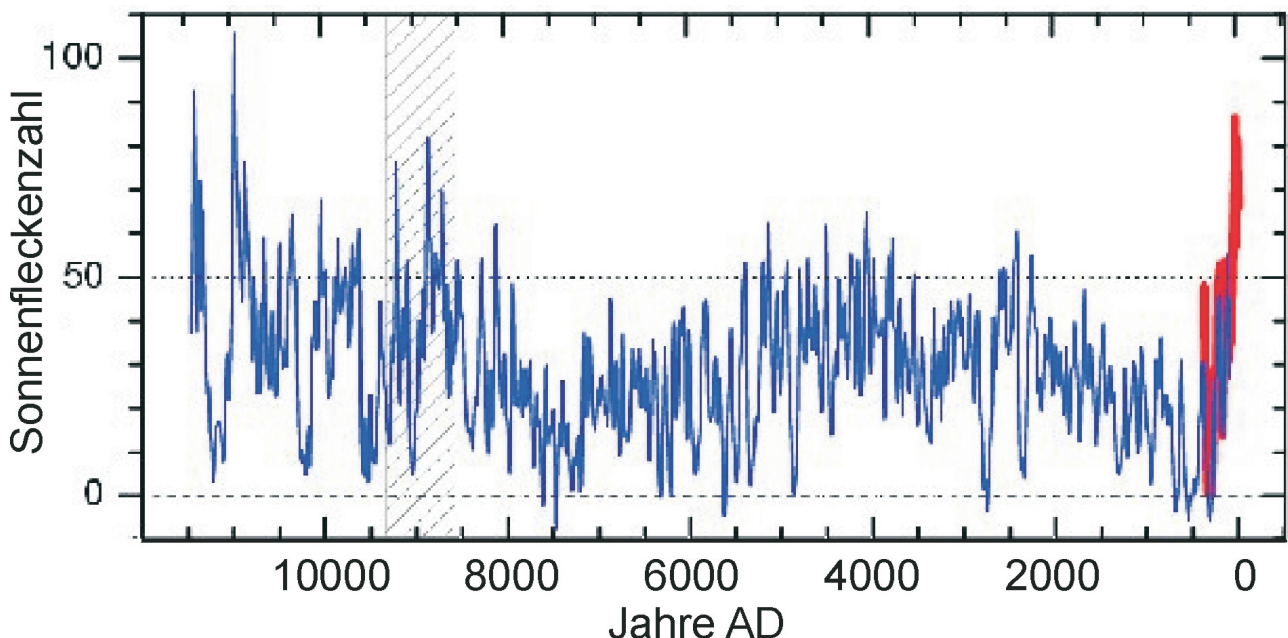


Abb. 8: Rekonstruktion der (jeweils über 10 Jahre gemittelten) Sonnenfleckenzahl aus der in Baumringen gemessenen Konzentration des radioaktiven Kohlenstoffs C-14 seit dem Ende der letzten Eiszeit (blau). Die Rekonstruktion endet im Jahr 1900, da die C-14-Daten danach durch die Verbrennung fossiler Brennstoffe verfälscht sind. Die direkten Messungen von Sonnenflecken seit 1610 sind rot eingezeichnet. Man muss über 8000 Jahre zurückgehen, um eine vergleichbare Episode ausgeprägt starker Sonnenaktivität zu finden, wie wir sie seit etwa 1940 beobachten.