

Sonne und Klima: Heisse Geschichten aus dem Eis

Dank der Paläoklimaforschung wissen wir heute, dass das Klima in der Vergangenheit nicht stabil, sondern zum Teil starken Schwankungen unterlegen war. Sonne, Vulkanismus und interne System-schwankungen waren in den letzten gut 10 000 Jahren die wichtigsten natürlichen Klimafaktoren. Seit der industriellen Revolution mischt auch der Mensch tüchtig mit und ist in den letzten 20 Jahren wohl der Hauptverursacher der steigenden Temperaturen. Um das komplexe Klimasystem verstehen und den Einfluss des Menschen auf das Klima abschätzen zu können, müssen zunächst die einzelnen natürlichen Klimafaktoren genauer unter die Lupe genommen werden. So untersucht die EAWAG, wie stark die Sonnenaktivität in der Vergangenheit variierte.

Die Sonne ist der weitaus grösste Energie-lieferant der Erde und deshalb der Motor unseres Klimasystems. Sie treibt die atmo-sphärische Zirkulation einerseits direkt durch ihre Einstrahlungsleistung an und

andererseits indirekt, indem sie die atmo-sphärische Zusammensetzung (z.B. Ozon, Wasserdampf) beeinflusst.

Dieser Energie-Input der Sonne wurde lange Zeit als konstant betrachtet und demzufolge

von den Klimatologen als «Solarkonstante» bezeichnet. Sie beträgt rund 1367 W/m^2 und gibt die Intensität der Sonnenstrahlung (= Irradianz) an, die auf die Atmosphären-obergrenze in einer Distanz von 1 astro-nomischen Einheit (mittlere Distanz Sonne-Erde) trifft. Direkte Messungen der Irradianz mittels Satelliten existieren erst seit 1978. Seither zeigt sich, dass die Solarkonstante gar keine Konstante ist. Tatsächlich weist sie zyklische Schwankungen mit einer durchschnittlichen Periode von 11 Jahren und einer mittleren Amplitude von 0,1% auf (Abb. 1A) [1]. Dies ist ein klares Indiz dafür, dass der Motor unseres Klimasystems nicht gleichmässig, sondern mal stärker, mal schwächer läuft. Verknüpft sind die Ände-rungen der Irradianz mit einer schwanken- den Sonnenaktivität. Wie sah es aber vor 1978 aus, als es noch keine direkten Mes-sungen gab? Gemeinsam mit anderen in-ternationalen Forschergruppen sucht die EAWAG nach Spuren, die es ermöglichen, die Sonnenaktivität bis weit in die Vergan-genheit hinein zu rekonstruieren [2, 3].

Sonnenflecken als Mass für die Sonnenaktivität

Erste Indizien für eine schwankende Son-nenaktivität sammelten Astronomen bereits vor 400 Jahren. Seit Erfindung des Tele-skops im Jahr 1610 werden Veränderun-gen auf der Sonnenoberfläche beobachtet und aufgezeichnet [4]. Dabei stellte man fest, dass die Anzahl der dunklen Sonnen-flecken stark variiert – sie kann zwischen 0 und ca. 300 Flecken liegen. Wie die Irradianz schwankt auch die Anzahl Sonnenflecken zyklisch mit einer Periode von rund 11 Jah-ren (Abb. 1B + 2). Die Sonnenflecken sind Ausdruck magnetischer Prozesse und somit ein direktes Mass für die Sonnenaktivität. Je aktiver die Sonne ist, desto mehr Sonnen-flecken gibt es auf ihrer Oberfläche. Dunkel erscheinen sie deshalb, weil sie eine redu-zierte Oberflächentemperatur von ca. 4000 Kelvin (entsprechen etwa 3700°C) gegen-über normal ca. 5800 Kelvin (entsprechen etwa 5500°C) haben und somit eine lokal

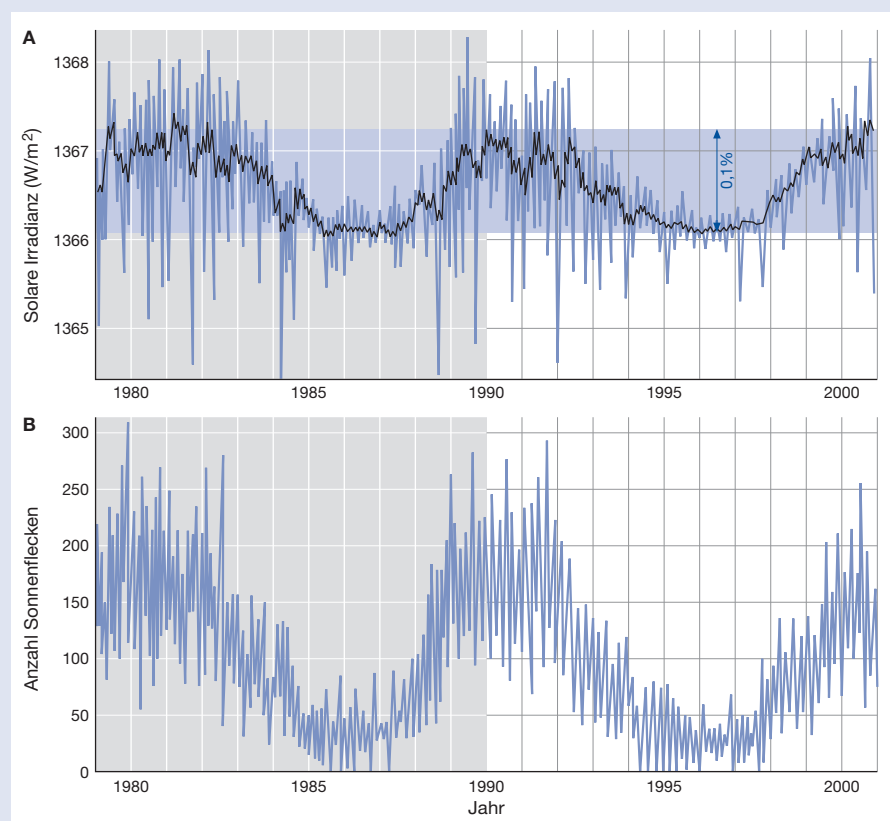


Abb. 1: Durch Satelliten gemessene Irradianz seit 1978 (A) [1] im Vergleich zur Anzahl der Sonnenflecken (B), die für den gleichen Zeitraum durch Beobachtung ermittelt wurden [4].

geringere Energieabstrahlung aufweisen. Da jedoch die Bereiche um die Flecken herum überdurchschnittlich heiss sind, ist die Abstrahlung einer Sonne mit vielen Sonnenflecken insgesamt grösser.

Dieser Zusammenhang wird auch durch die Satellitenmessungen der Irradianz bestätigt: die beiden Kurven verlaufen parallel zueinander (Abb. 1A + B). Viele Wissenschaftler hat dies darin bestärkt, aus der Anzahl Sonnenflecken die Irradianz zu rekonstruieren und damit Rückschlüsse auf Veränderungen im Klimageschehen der vergangenen 400 Jahre zu ziehen.

Stark schwankende Sonnenaktivität in den letzten 400 Jahren

Betrachtet man die bald vierhundertjährigen Aufzeichnungen der Sonnenflecken [4], zeigt sich, dass die Sonnenaktivität deutlich stärker und unregelmässiger schwankte als bisher durch Satelliten gemessen wurde (Abb. 2). So wurden während des Maunder-Minimums von 1645–1715 fast keine und während des Dalton-Minimums von 1795–1830 nur sehr wenige Sonnenflecken beobachtet, was auf eine relativ inaktive

Sonne schliessen lässt. Seither nimmt die Anzahl der Sonnenflecken kontinuierlich zu. Lean und Kollegen wollten es genauer wissen und versuchten anhand der Anzahl Sonnenflecken die Intensität der vergangenen Sonnenstrahlung zu beziffern. Danach hat die Irradianz seit dem Maunder-Minimum um 0,24% zugenommen [2] (Abb. 3). Dies ist eine deutlich grössere Änderung als die bisher gemessenen Schwankungen. Aus der Beobachtung anderer Sonnensysteme weiss man, dass die Irradianz durchaus stark variieren kann. So kann die Abstrahlung von Sternen, die in ihren Eigenschaften der Sonne ähnlich sind, um bis zu 1% schwanken. Zudem sprechen verschiedene klimatische Spuren auf der Erde dafür, dass solche Schwankungen der Irradianz nicht unrealistisch sind. Beispielsweise fällt die so genannte Kleine Eiszeit, die von ca. 1400–1850 dauerte und von der in den Alpen grosse Moränenablagerungen riesiger Gletschervorstösse zeugen, mit einer reduzierten Sonnenaktivität zusammen. Ferner kann aus historischen Quellen entnommen werden, dass die Themse während der Kleinen Eiszeit allwinterlich zufror. Im Winter 1683/84, mitten im Maunder-Minimum, wird eine besonders dicke Eisbedeckung notiert. Ab Winter 1813/14 froh die Themse jedoch nicht mehr zu, seither ziehen sich auch die Gletscher in den Alpen wieder kontinuierlich zurück und die Anzahl Sonnenflecken nimmt stetig zu.

Archivierung der Sonnenaktivität der letzten 11500 Jahre im Eis der Polkappen

Was aber tun, will man noch weiter als nur 400 Jahre in die Vergangenheit zurückgehen? Hier setzt die aktuelle Forschungs-

arbeit der EAWAG an. Unser Ziel ist es, die Sonnenaktivität über das gesamte Holozän, das ist die seit etwa 11 500 Jahren anhaltende Warmzeit, zu rekonstruieren. Wieder sind wir auf indirekte Hinweise angewiesen. Als Mass für die vergangene Sonnenaktivität untersuchen wir die Menge des kosmogenen Radionuklids Beryllium-10 (^{10}Be), das durch kosmische Strahlung in der Atmosphäre produziert wurde und das nun, nachdem es mit dem Niederschlag ausgewaschen wurde, in den Eiskappen der Pole nachweisbar ist (siehe Leitartikel S. 4). In diesen mächtigen Eisarchiven kann man in einer relativ kurzen vertikalen Ausdehnung sehr weit in die Vergangenheit zurückgehen, da die einzelnen Jahreslagen durch den Druck der darüber liegenden jüngeren Eisschichten und durch das Eisfließen stark ausgedünnt wurden. Der von der EAWAG untersuchte GRIP-Eisbohrkern aus Grönland ist ca. 3 km lang und umfasst etwa 100 000 Jahre. In einer Sisyphusarbeit wurde darin zunächst – Lage für Lage – die ^{10}Be -Konzentration bestimmt (siehe Artikel von S. Bollhalder und I. Brunner, S. 6). Beachtet man zwei wichtige Zusammenhänge, kann man in einem anschliessenden Schritt ausgehend von der ^{10}Be -Konzentration auf die Sonnenaktivität zurückschliessen:

- Die ^{10}Be -Produktion hängt nicht nur von der Sonnenaktivität, sondern auch von Schwankungen des Erdmagnetfelds ab. Will man also die Sonnenaktivität rekonstruieren, muss der Einfluss des Magnetfelds herausgerechnet werden.
- Die im Eis messbare ^{10}Be -Konzentration wird sowohl von der in der Atmosphäre produzierten ^{10}Be -Menge als auch von der Niederschlagsmenge beeinflusst – je grösser die Niederschlagsmenge, desto stärker wird

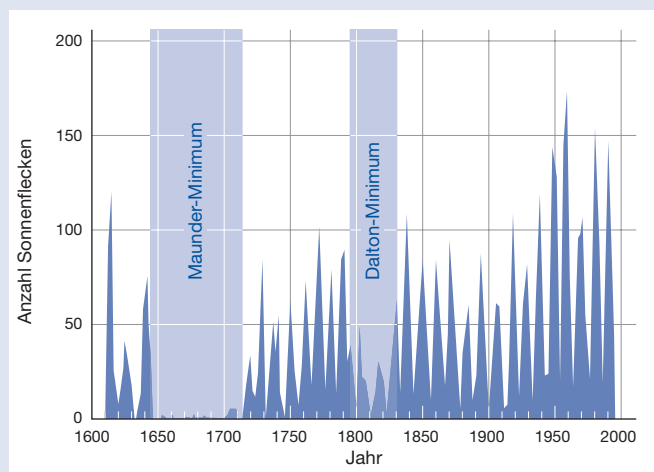


Abb. 2: Die Anzahl der Sonnenflecken seit 1610 [4], dargestellt sind die jährlichen Mittelwerte. Je aktiver die Sonne, desto mehr Sonnenflecken entstehen auf ihrer Oberfläche. Neben dem deutlichen 11-Jahres-Zyklus ist ein zunehmender Trend in der Aktivität seit Beginn des 18. Jahrhunderts feststellbar.

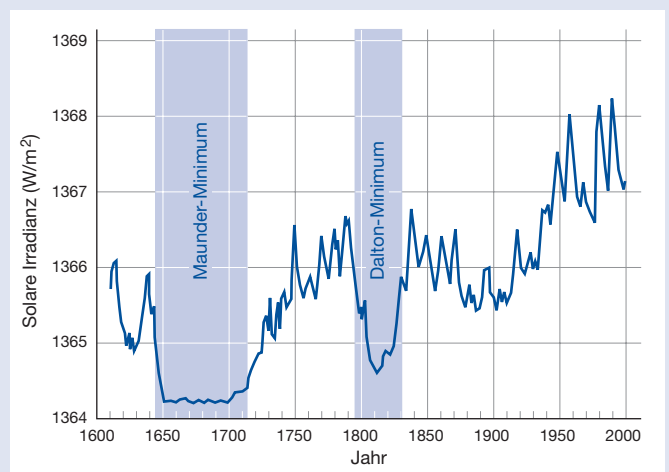


Abb. 3: Verlauf der bis ins Jahr 1610 rekonstruierten Irradianz. Die Rekonstruktion basiert auf Sonnenfleckenaufzeichnungen und der Beobachtung von Sternen, die der Sonne ähnlich sind. Danach hat die Irradianz seit dem Maunder-Minimum um 0,24% zugenommen. Verändert nach [2].

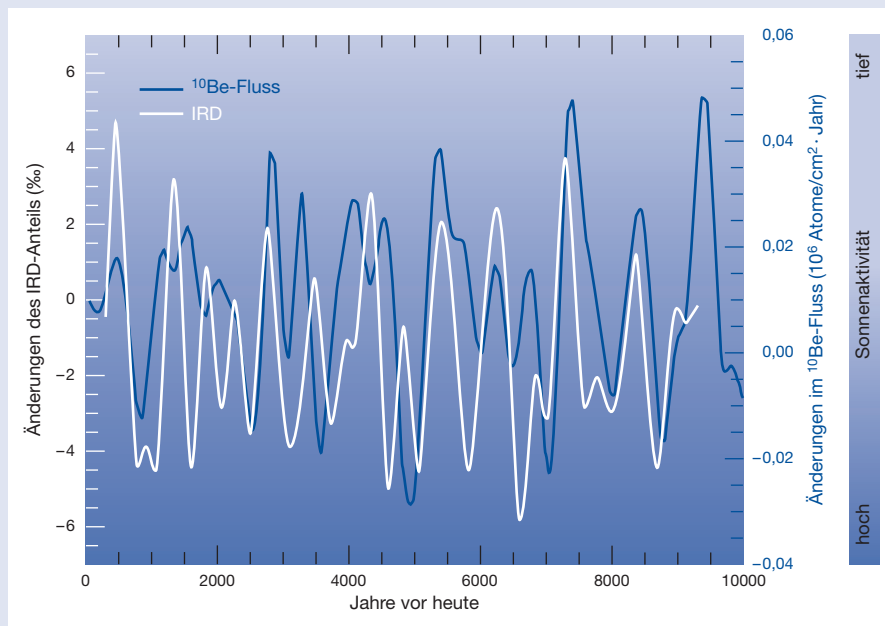


Abb. 4: Änderungen des ^{10}Be -Flusses im GRIP-Eisbohrkern (dunkelblaue Kurve) und Änderungen des IRD-Anteils im Sediment (weisse Kurve). IRD = «ice-rafted debris». Vereinfacht nach [3].

das ^{10}Be verdünnt. Daher steht als Mass für die Sonnenaktivität nicht einfach die ^{10}Be -Konzentration, sondern man errechnet den ^{10}Be -Fluss und gibt damit die Anzahl ^{10}Be -Atome an, die pro Quadratcentimeter und Sekunde mit dem Niederschlag im Eis abgelagert wurden.

Unsere Untersuchungen ergaben, dass der ^{10}Be -Fluss und damit die Sonnenaktivität über das gesamte Holozän recht unregelmässig war (Abb. 4, dunkelblaue Kurve). Dabei zeigt ein niedriger ^{10}Be -Fluss eine aktive Sonne und ein hoher ^{10}Be -Fluss eine weniger aktive Sonne an. Derzeit arbeiten wir daran, diese relativen Aussagen zur Sonnenaktivität als Irradianzwerte auszudrücken. Analog zur oben beschriebenen Rekonstruktion der Irradianz aus den Sonnenflecken versuchen wir die Irradianz aus den ^{10}Be -Daten abzuleiten.

Weitere klimatische Hinweise durch gewanderte Eisberge

Weitere Indizien, die für einen schwankenden Einfluss der Sonne im Holozän sprechen, kommen aus anderen Paläoarchiven [3]. Verschiedene Sedimentkerne aus Tiefseebohrungen im östlichen Nordatlantik etwa auf der Höhe Irlands und im Westatlantik auf der Höhe Neufundlands weisen mehrere markante Lagen gröberer Materials auf. Während normalerweise so weit von der Küste entfernt nur noch feinputikuläre Tone und Schlamm in den Sedimenten der Tiefsee abgelagert werden, weisen jene Lagen Korngrößen der Sandfraktion und grösser auf. Woher kommt dieses Material? Einer sehr wahrscheinlichen Erklärung nach

ist es mit den Eisbergen dort hin verfrachtet worden. Beim Kalben der Eisberge (Abbrechen der Eisberge vom Gletscher ins Wasser) wird vom Gletscher erodierter und an deren Unterseite angefrorener Gesteinschutt mit auf das Meer hinausgetragen. Schmilzt der Eisberg, so sinkt der Schutt auf den Meeresboden. Seiner Transportart nach wird dieses grobpartikuläre Material im Sediment auch als «ice-rafted debris» (= IRD, «mit dem Eis geflösster Schutt») bezeichnet.

Rotes Grönlandgestein im Sediment der Tiefsee

Genauere Untersuchungen der Zusammensetzung des IRD in den Sedimentkernen lassen Rückschlüsse auf die Herkunft der Partikel zu. Vulkanisches Glas deutet auf die Vulkaninsel Island als Ursprungsort hin. Als weitere so genannte petrologische Tracer finden sich Mineralien, die aus Grönland und Neufundland stammen müssen. Beispielsweise verrät eine rötlich gefärbte Komponente, dass es sich um Mineralien handelt, die von den «red beds», einer typischen Gesteinsformation Ost-Grönlands, weg-erodiert worden sind.

Die Fundorte dieser polaren Gesteinsfragmente zeugen davon, dass Eisberge im Verlauf des Holozäns immer wieder recht weit nach Süden vordringen konnten. Möglich war dies nur bei sehr niedrigen Luft- und Meerwassertemperaturen, die das Abschmelzen der Eisberge verzögerten. Somit sind diese groben Gesteinslagen eindeutige Indikatoren für kältere Klimaperioden. Durch mühsames Zählen unter dem Mikroskop hat die Forschungsgruppe von G. Bond den

IRD-Anteil in mehreren Sedimentkernen bestimmt (Abb. 4, weisse Kurve) [3] und diese Ergebnisse mit den ^{10}Be -Daten der EAWAG (Abb. 4, dunkelblaue Kurve) verglichen. Beide Kurven zeigen ein in etwa übereinstimmendes Muster. Ein hoher IRD-Anteil im Sediment deutet auf eine Kaltzeit hin, währenddessen Eisberge weit nach Süden vordringen konnten. Im Verlauf von Warmzeiten schmelzen die Eisberge bereits viel weiter nördlich, was sich durch einen niedrigen IRD-Anteil in den untersuchten Sedimentproben ausdrückt.

Aus unseren Ergebnissen lassen sich die folgenden beiden Zusammenhänge ableiten:

- Ein «hoher IRD-Anteil \approx Kaltzeit» ist mit einem «hohen ^{10}Be -Fluss \approx inaktive Sonne» korreliert.
- Ein «niedriger IRD-Anteil \approx Warmzeit» ist mit einem «niedrigen ^{10}Be -Fluss \approx aktive Sonne» verknüpft.

Dies deutet daraufhin, dass das Driftverhalten der Eisberge im Holozän wahrscheinlich von der Sonne gesteuert wurde.

All diese Beobachtungen belegen die bedeutende Rolle, welche die Sonne in unserem Klimasystem spielt. Doch es sind noch viele Fragen offen: Wie reagiert unser Klimasystem auf Änderungen in der Strahlungsmenge? Welches sind die verantwortlichen Prozesse? Wie werden geringe Änderungen der Sonnenaktivität intern durch das Klimasystem der Erde verstärkt, z.B. in der Atmosphäre? Die aktuelle Forschung sucht Antworten auf diese Fragen und hält den Blick offen für weitere Indizien.



Maura Vonmoos, Erdwissenschaftlerin, rekonstruiert derzeit im Rahmen ihrer Doktorarbeit in der Abteilung «Oberflächen-gewässer» die Sonnenaktivität im Holozän.

- [1] Fröhlich C. (2000): Observations of irradiance variations. *Space Science Reviews* 94, 15–24.
- [2] Lean J., Beer J., Bradley R. (1995): Reconstruction of solar irradiance since 1610: implications for climate change. *Geophysical Research Letters* 22, 3195–3198.
- [3] Bond G., Kromer B., Beer J., Muscheler R., Evans M.N., Showers W., Hoffmann S., Lotti-Bond R., Hajdas I., Bonani G. (2001): Persistent Solar Influence on North Atlantic Climate During the Holocene. *Science* 294, 2130–2136.
- [4] Hoyt D.V., Schatten K.H. (1998): Group sunspot numbers: a new solar activity reconstruction. *Solar Physics* 179, 189–219.