

3.6. Einfluss der Sonnenaktivität auf Klimaschwankungen

3.6.1. Einleitung

Die Sonne spielt für die Atmosphäre der Erde eine grosse Rolle. Sie emittiert Strahlung in verschiedenen Spektralbereichen. Wichtig sind in unserem Zusammenhang die Gesamtstrahlung sowie (im Hinblick auf stratosphärische Prozesse) die UV-Strahlung. Die Sonne emittiert auch Teilchen, welche als Sonnenwind die Umgebung der Erde erreichen (z. B. Protonen) und teilweise in die Atmosphäre eindringen können. Gleichzeitig moduliert der Sonnenwind den Fluss kosmischer Strahlung, der die Erde erreicht. Die Sonnenstrahlung sowie der Sonnenwind (und damit die kosmische Strahlung welche die Erde erreicht) sind nicht immer gleich stark, was sich entsprechend auf die Atmosphäre auswirken kann.

Es gibt kaum ein kontroverseres Thema in der Klimawissenschaft als die Beziehung zwischen Sonne und Klimaschwankungen. Zwar ist klar, dass es einen solchen Einfluss gibt, aber die Meinungen darüber, wie stark er ist, welchen Effekt er in der Vergangenheit gehabt hat und vor allem welcher Mechanismus dahinter steckt, gehen stark auseinander. In diesem Kapitel soll ein kurzer Überblick über dieses Thema gegeben werden. Nach einem Kurzaufsatz der Geschichte wird die Schwankung der Sonnenaktivität für verschiedene Spektralbereiche dargestellt und Masse zur Erfassung der Sonnenaktivität vorgestellt. Der beobachtete Einfluss dieser Schwankungen auf das Klima wird kurz diskutiert, und vier verschiedene Hypothesen, wie dieser Einfluss erfolgt, vorgestellt.

3.6.2. Geschichte

Die Sonne ist der „Motor“ des Klimas. Unterschiede in der Sonneneinstrahlung treiben das Klimasystem an. Der Gedanke ist deshalb naheliegend, Klimaschwankungen mit Schwankungen der Sonnenaktivität in Verbindung zu bringen. Besonders nach der Entdeckung der Sonnenflecken (in unserem Teil der Welt durch Galilei, vgl. Fig. 54; in China und Ägypten waren Sonnenflecken aber schon lange vorher beobachtet worden) wurden Wetter- oder Klimaextreme oft mit Sonnenflecken in Verbindung gebracht.

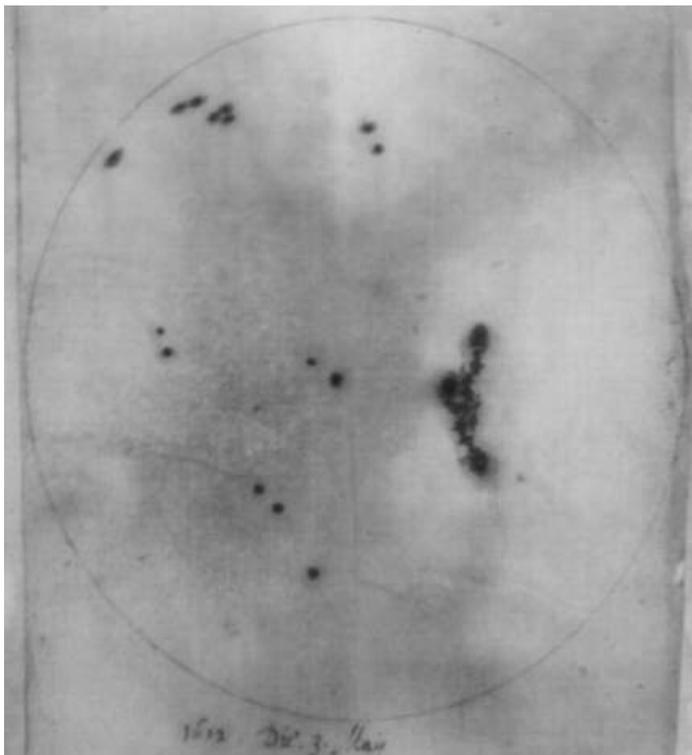


Fig. 54: Zeichnung von Sonnenflecken durch Galilei (1612).

Im Jahr 1801 publizierte der Astronom William Herschel einen Artikel, in welchem er Zeitreihen von Sonnenfleckenbeobachtungen verglich mit Daten zur Getreideernte (ein Klimaindikator). Er postulierte eine Verbindung zwischen den Sonnenflecken und dem Klima auf der Erde. Allerdings war das physikalische Verständnis der Sonne damals sehr schlecht (so glaubte Herschel, die Sonne sei bewohnt).

Einige Jahrzehnte später wurde entdeckt, dass die Sonnenflecken einen sehr regelmässigen, 11-jährigen Zyklus haben. Damit erhöhte sich die Hoffnung, das Klima voraussagen zu können. Das führte zu einem regelrechten Boom von Arbeiten zum Thema Sonnenflecken und Klima im 19. und frühen 20. Jahrhundert.

Das Thema Sonne und Klima blieb ein kontroverses Thema bis heute. Trotz den vorhandenen Satellitenmessungen, trotz besserem Wissen über die Sonne und über das Klima der Erde wissen wir immer noch nicht, wie das Klima der Erde von Schwankungen der Sonnenaktivität abhängt.

3.6.3. Schwankungen der Sonne

Der Ursprung der schwankenden Sonnenaktivität sind magnetische Schwankungen der Sonne sowie möglicherweise andere Prozesse wie Konvektion. Die wichtigste Schwankungsperiode ist der 11-jährige Zyklus der Sonnenaktivität. Daneben gibt es einen 22-jährigen Zyklus der Polarität (jeder 2. Zyklus) sowie verschiedene postulierte längere Zyklen, insbesondere der Gleissbergzyklus von ungefähr 80 Jahren sowie ein etwa 200-jähriger Zyklus.

Eine Äusserung der Schwankungen der Sonnenaktivität sind Sonnenflecken (vgl. Fig. 54), welche von der Erde aus von blossen Auge beobachtet werden können. Eine andere sichtbare Äusserung dieser Sonnenaktivität sind die Sonnenfackeln (Fig. 55).

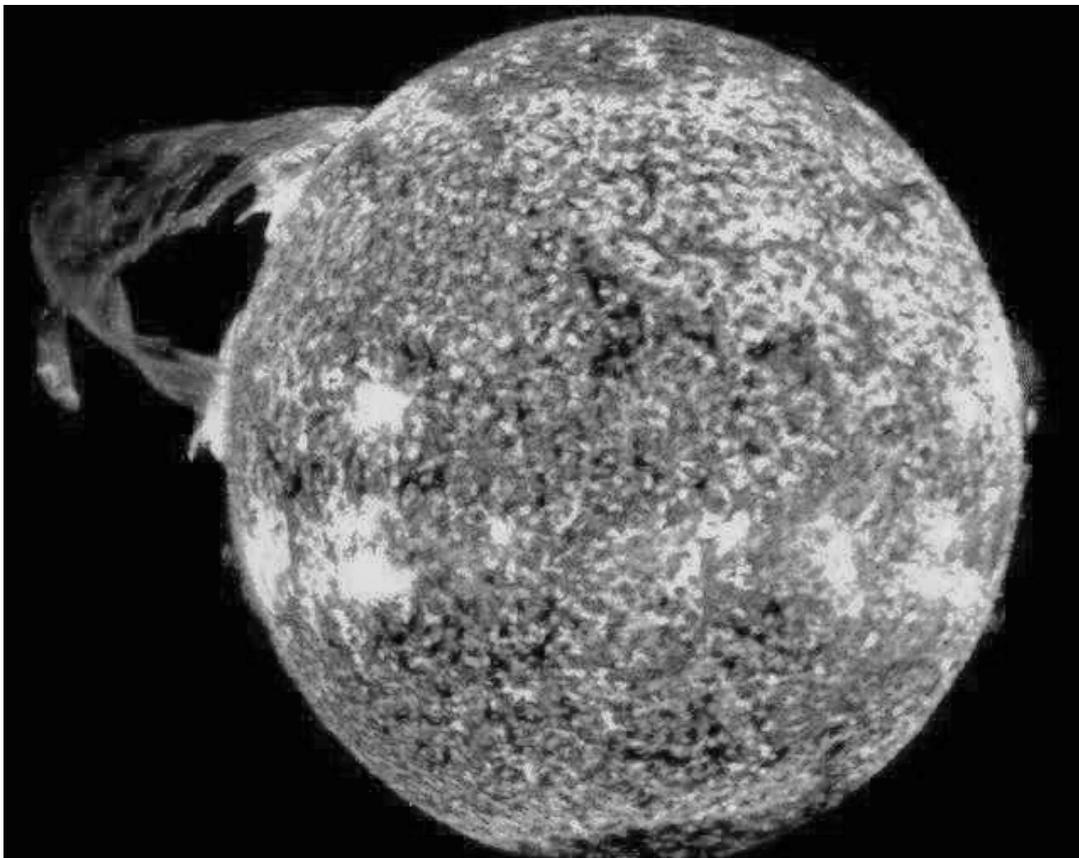


Fig. 55: Sonnenfackel.

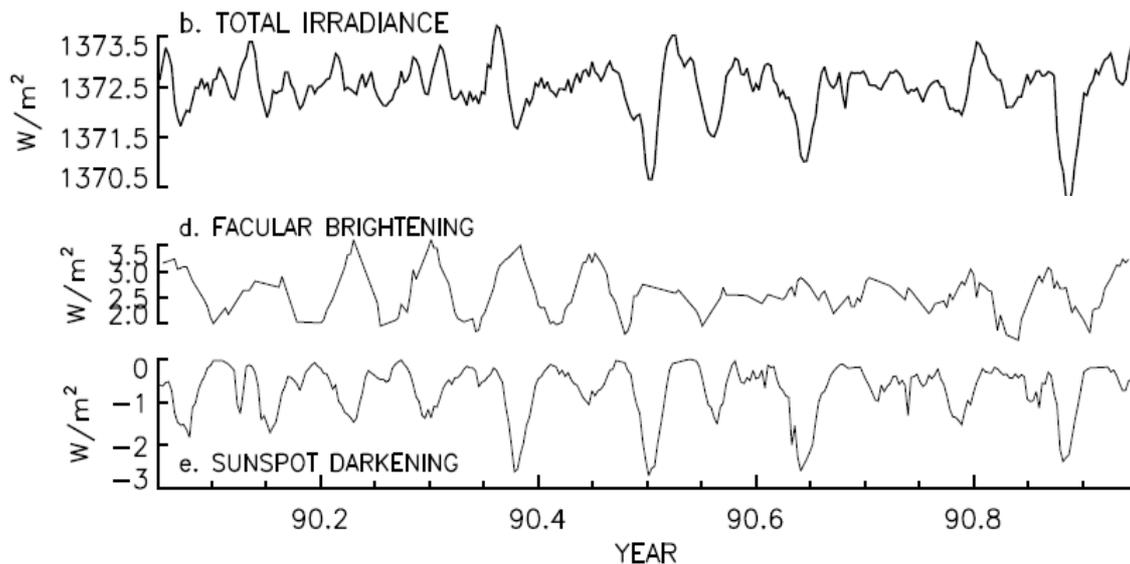


Fig. 56: Schwankung der Gesamtstrahlung im Jahr 1990 und Proxies für die Beiträge der Schwankungen der Sonnenflecken und Fackeln (Lean 1997).

Sonnenflecken sind häufiger, wenn die Sonne „aktiv“ ist. Sie führen zu einer Verminderung der Sonnenstrahlung. Gleichzeitig mit den Sonnenflecken treten jedoch auch die Sonnenfackeln auf welche zu einer Zunahme der Strahlung führen (Fig. 56). Letztere ist grösser als die Abnahme wegen den Sonnenflecken und deshalb ist die Sonnenstrahlung insgesamt stärker, wenn es mehr Sonnenflecken hat. Vor allem hat sie aber eine viel grössere hochfrequente Variabilität zur Zeit der Aktivitätsmaxima. Da Sonnenflecken und Fackeln an bestimmten Orten auftreten und die Sonne sich dreht, schwankt die Sonnenstrahlung auch mit der Rotationsperiode der Sonne, welche 27 Tage dauert. Dies ist in Fig. 56 schön ersichtlich. Fackeln und Flecken haben eine Lebensdauer im Bereich von wenigen Wochen.

Die Strahlung in verschiedenen Spektralbereichen stammt von jeweils unterschiedlichen Regionen der Sonne, die wiederum unterschiedlich von der schwankenden Sonnenaktivität betroffen sind. Deshalb ist die Variabilität im Verlauf eines Sonnenzyklus sehr stark spektral abhängig. Über den 11-jährigen Zyklus schwankt die Gesamtstrahlung der Sonne (dominiert durch den sichtbaren Bereich) nur sehr geringfügig, im Bereich von 0.1%. Dagegen sind die Schwankungen stärker im UV-Bereich. Bei 200 nm Wellenlänge beträgt die Schwankung schon einige Prozent.

3.6.4. Masse der Sonnenaktivität

Figur 57 stellt zusammen, welche Anhaltspunkt wir über Schwankungen der Sonnenaktivität in verschiedenen Zeitskalen haben. Direkte Messungen der Sonnenstrahlung in verschiedenen Spektralbereichen in der nötigen Präzision (die Gesamtstrahlung schwankt nur um 0.1%!) sind nur vom Weltraum möglich. Solche Messungen gibt es seit 1979, wobei die Kalibration der verschiedenen Instrumente auf unterschiedlichen Satelliten eine enorm schwierige Aufgabe ist. Zwar umfassen die Messungen bereits drei Sonnenmaxima und zwei Minima, es ist aber nicht möglich, daraus Aussagen über mögliche niederfrequente Veränderungen der Sonnenaktivität zu machen.

Messungen von der Erde aus sind durch Wolken und Spurengase in der Atmosphäre zu stark beeinträchtigt, als dass sie Rückschlüsse auf die Sonne zuliessen. Von der Erde aus wird aber der Radio flux bei 10.7 cm seit Ende der 1940er Jahre gemessen. Dieser Fluss wird durch die Atmosphäre nicht beeinträchtigt. Die Messungen zeigen, dass es Schwankungen von Zyklus zu Zyklus gibt. Allerdings können diese Angaben nicht direkt auf andere Spektralbereiche,

die uns mehr interessieren, übertragen werden. Das zeigen Vergleiche in der Satellitenperiode. Weiter zurück gibt es Beobachtungen von Sonnenflecken. In China werden solche Beobachtungen seit 2000 Jahren durchgeführt. Systematische Beobachtungen mit Fernrohren in Europa gibt es ungefähr seit dem 17. Jahrhundert. Auch diese Daten zeigen, dass es zum Teil grosse Unterschiede zwischen den Zyklen gibt. Es gab sogar längere Perioden in welche gar keine Flecken aufgetreten sind (z. B. Maunder Minimum, 1645-1715). Auch hier ist es aber schwierig, direkt von den Sonnenflecken auf schwankende Strahlung zu schliessen. Neben der absoluten Zahl (oder Fläche) der Sonnenflecken verwenden manche Wissenschaftler auch die Länge des Sonnenfleckenzyklus und postulieren, dass die Strahlung höher liegt wenn der Zyklus kurz ist (das könnte Beispielsweise mit dem noch nicht beendeten Abklingen des letzten Zyklus und damit einer Überlagerung zu tun haben). Hier gibt es aber Unsicherheiten.

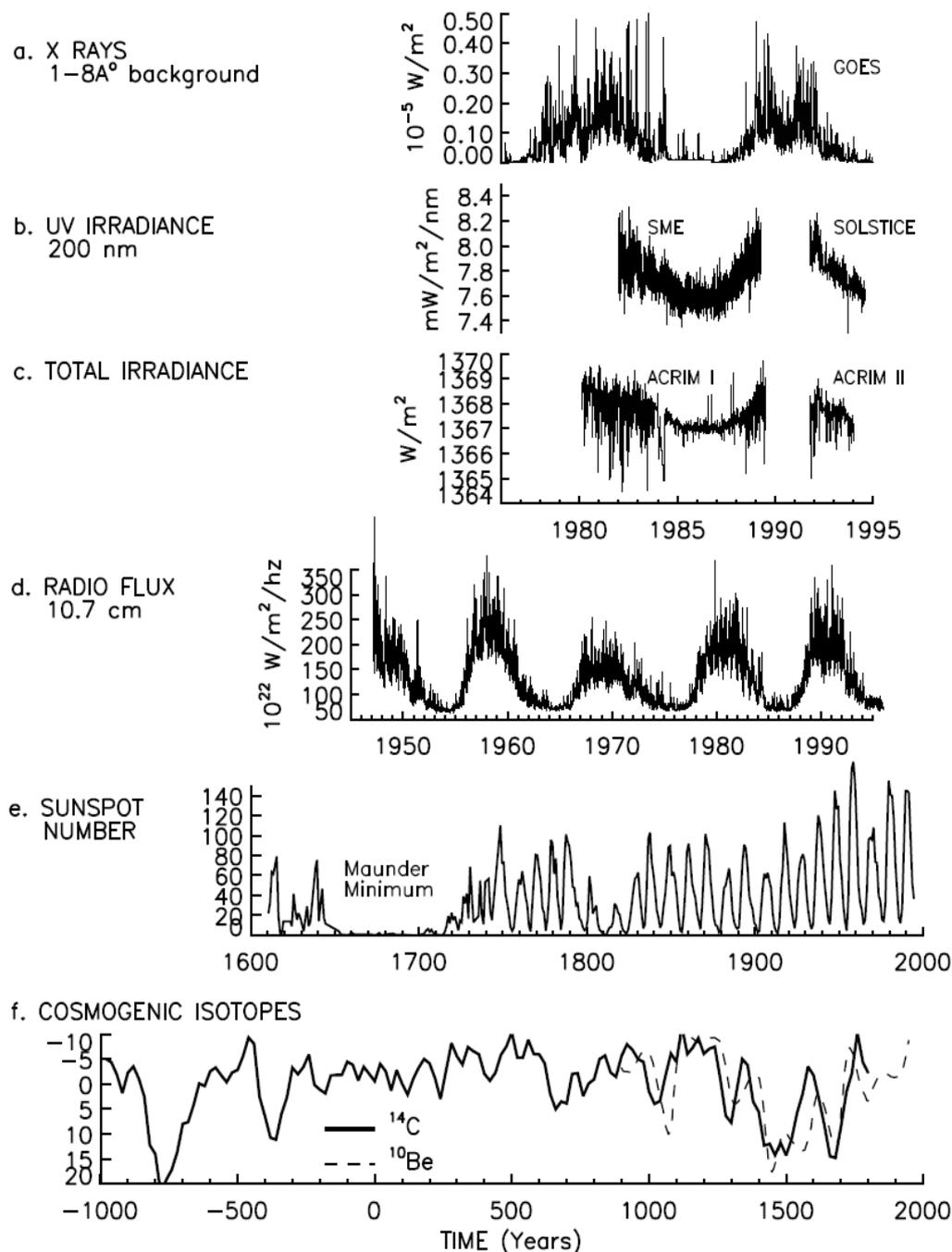


Fig. 57: Verschiedene Masse der Sonnenaktivität beobachtet von Satelliten (a-c) respektive auf der Erde (d-f) (aus Lean 1997).

Energiereiche Teilchen führen in der Atmosphäre zur Bildung von bestimmten Isotopen (C^{14} , Be^{10}), die in die Umwelt gelangen und beispielsweise in Baumringen gemessen werden können. Aus solchen Daten werden Rekonstruktionen der Sonnenaktivität durchgeführt, welche mehrere Tausend Jahre zurück reichen. Auch diese Daten sind nur indirekte Daten und es stellt sich die Frage, auf welchen Zeitskalen die Sonne wirklich schwankt. Das Problem bleibt, dass physikalische Modelle der Sonne nicht gut genug sind, um den 11-jährigen Sonnenzyklus zu reproduzieren, und die physikalischen Ursachen sind weitgehend unbekannt. Es können daher nur statistische Verfahren eingesetzt werden, deren Kalibration auf die Satellitenperiode beschränkt ist. Auch ist noch nicht klar, ob die „Ruhephasen“ des Zyklus, also die Minima der Sonnenfleckenzahl, immer gleich stark waren. Niederfrequente Schwankung wären in dieser Sichtweise nur durch die unterschiedlich stark ausfallenden Maxima bedingt.

3.6.5. Einfluss auf das Klima

3.6.5.1. Die 27-tägige Rotation der Sonne

Der Einfluss der 27-tägigen Rotation der Sonne auf die Strahlung ist nochmals um Einiges kleiner als beim 11-jährigen Zyklus und ist daher nicht von irgendeiner praktischen Relevanz. Trotzdem interessiert der 27-tägige Zyklus, da man sich erhofft, hier die Mechanismen besser zu verstehen, die auch beim 11-jährigen Zyklus spielen. Die vorhandenen Satellitendaten decken erst gut zwei 11-jährige Zyklen ab, im Vergleich zu etwa 300 Rotationen der Sonne. Aus statistischer Sicht sind die Chancen also besser, hier zu Ergebnisse zu kommen. Allerdings ist der 27-tägliche Zyklus nur ausgeprägt bei Aktivitätsmaxima.

Ein Einfluss der 27-tägigen Rotation auf die Atmosphäre ist am besten sichtbar in der Temperatur und der Ozonkonzentration der tropischen oberen Stratosphäre. Dabei handelt es sich um einen kombinierten Einfluss von photochemischen Vorgängen, Strahlungsprozessen und dynamischen Vorgängen. Die Ozonkonzentration ist höher bei höherer UV-Strahlung (Fig. 58). Die sehr kurzwellige UV-Strahlung erreicht jedoch nicht die untere Stratosphäre, wo ebenfalls ein klares Signal der 27-tägigen Rotation gefunden wird. Dies muss deshalb auf andere Weise, vermutlich dynamisch erklärt werden.

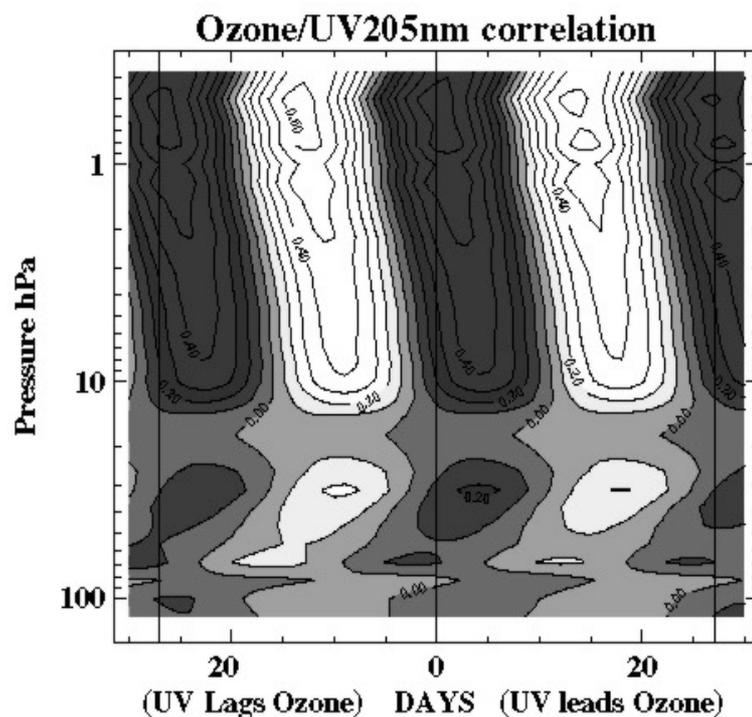


Fig. 58: Korrelation zwischen UV-Strahlung und der Ozonkonzentration auf einer täglichen Skala im Modell (Joanna Haigh).

Ein Einfluss der 27-tägigen Rotation findet sich auch ausserhalb der Tropen, sogar in den Temperaturen am Erdboden in den Polargegenden. Hier ist offensichtlich, dass es sich nicht um einen direkten Effekt handeln kann, sondern nur um einen dynamisch erzeugten (vgl. Kapitel 3.6.6.). Diese Arbeiten deuten deshalb darauf hin, dass die Schwankungen der solaren UV-Strahlung die Aktivität planetarer Wellen beeinflussen.

3.6.5.2. Der 11-jähriger Sonnenzyklus

Der Einfluss des 11-jährigen Zyklus auf das Erdklima ist ebenfalls am sichtbarsten in der Stratosphäre. Er führt hier wie der 27-tägige Zyklus zu einer Zunahme des Ozons und der Temperatur. Figur 59 zeigt die Differenz der Temperatur auf 30 hPa zwischen Jahren des Sonnenmaximums und des Sonnenminimums. Eine Erhöhung der Temperatur in den Subtropen ist deutlich sichtbar. Die Daten zeigen allerdings auch, dass der Einfluss durch die Quasi-Biennial Oscillation moduliert wird. Werden nur Jahre der Ostphase der QBO ausgewählt (unten) ist der Effekt noch wesentlich stärker.

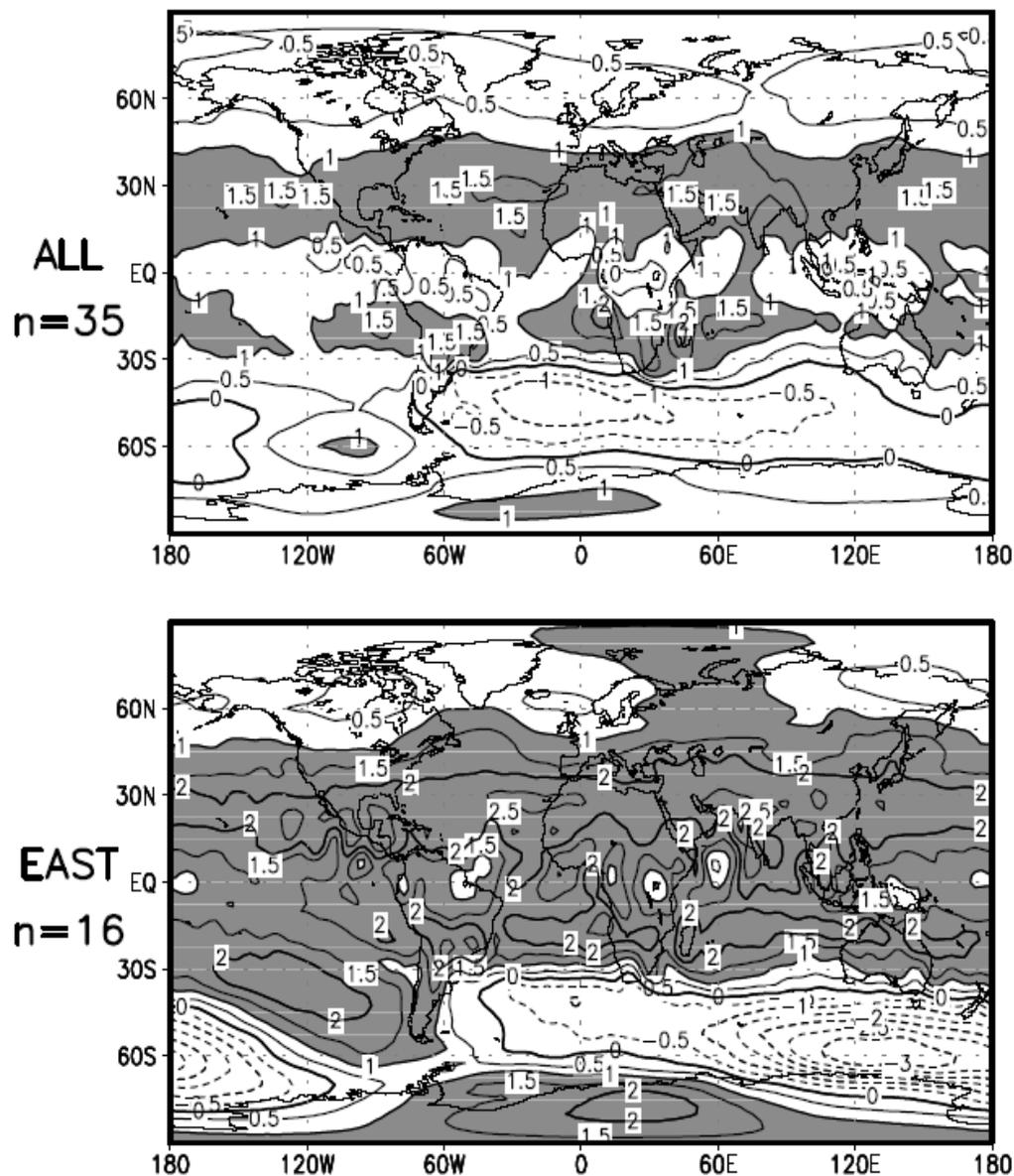


Fig. 59: Differenz der Temperatur auf 30 hPa zwischen Jahren des Sonnenmaximums und des Sonnenminimums. Oben: Alle Daten, unten: Nur QBO-Ost Jahre (aus Labitzke 2003).

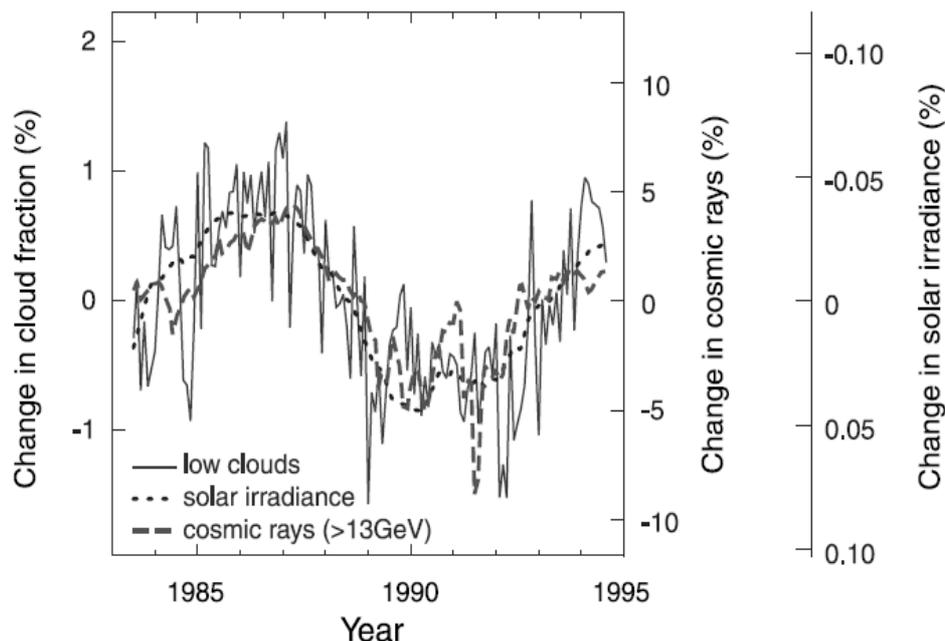


Fig. 60: Bewölkung, Gesamtstrahlung und kosmische Strahlung (aus Svensmark und Friis-Christensen 1997 und Carlsaw et al., 2001).

Ein Einfluss der Sonnenaktivität auf die Stärke des stratosphärischen Polarwirbels ist statistisch nachgewiesen, und zwar verhält er sich je nach QBO Phase genau umgekehrt. Die Gründe dafür sind allerdings noch unbekannt.

In der Troposphäre sind während des Sonnenmaximums der Subtropenjet und die Ferrell-Zelle (ein Name für die zonal gemittelte Meridionalzirkulation der Mittelbreiten) nach Norden verschoben. Im Modell wird dies reproduziert und auf eine Abschwächung und gleichzeitige Polwärtsausbreitung der Hadleyzirkulation zurückgeführt, welche wiederum „von oben“ durch Ozonänderungen in der Stratosphäre verursacht wird. Auch hier sind aber noch viele Fragen offen.

An der Erdoberfläche ist der Effekt des 11-jährigen Sonnenzyklus nicht mehr gross und entspricht etwa dem, was man aus energetischen Überlegungen erwarten kann. Dabei spielen auch die Ozeane eine grosse Rolle, welche durch ihre Energiespeicherung den thermischen Effekt dämpfen. Am meisten erstaunt wohl aber die 1997 von Svensmark und Friis-Christensen vorgestellte hohe Korrelation zwischen dem Sonnenfleckenzyklus und der Bewölkung. Diese Arbeit hat einige heftige Debatten ausgelöst, unter anderem weil der physikalische Mechanismus unbekannt war (und immer noch ist, vgl. Kapitel 3.6.6) und die Datenbasis (weniger als zwei Sonnenzyklen) sowie die Methode (Filterung der Daten) zu Artefakten führen können. Das Resultat dieser Debatten ist noch ausstehend.

3.6.5.3. Interdekadale Schwankungen

Am meisten Interesse besteht wohl am möglichen Einfluss auf der interdekadalen Skala. Insbesondere stellt sich die Frage, inwiefern oder zu welchem Anteil die Sonnenaktivität zum globalen Temperaturanstieg der letzten Jahrzehnte beigetragen hat. Einige Autoren haben eine gute Übereinstimmung zwischen der Länge des Sonnenzyklus und der Temperatur der Landmassen der Nordhemisphäre gefunden (Fig. 61). Allerdings ist ein solcher Zusammenhang umstritten und physikalisch schlecht begründet. Ausserdem klaffen die beiden Kurven in den letzten Jahrzehnten auseinander: Die Sonne kann die jüngste Klimaerwärmung sicher nicht

erklären. Vermutlich leistete sie aber einen Beitrag zur Erwärmung in der ersten Jahrhunderthälfte. Zumindest zeigen das Klimamodelle. Allerdings ist die tatsächliche Schwankung der Sonnenaktivität in der ersten Jahrhunderthälfte recht umstritten.

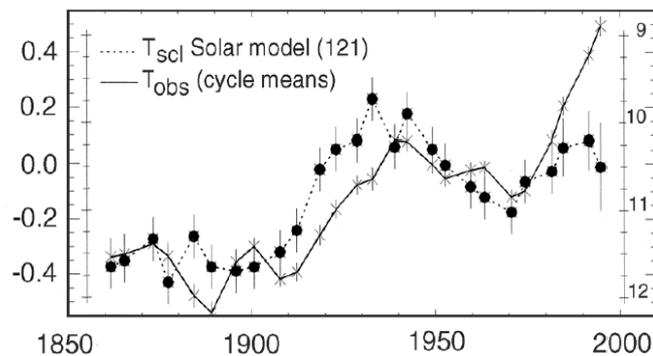


Fig. 61: Länge des Sonnenzyklus und Temperatur der nordhemisphärischen Landmassen (Thejll und Lassen 2001).

3.6.6. Mechanismen

Wie funktioniert der Einfluss der Sonne auf das Klima? Auch nach 200 Jahren der Forschung ist diese Frage nicht beantwortet. Es gibt verschiedene Hypothesen, die in vier Gruppen gegliedert werden können:

- Schwankungen der Gesamtstrahlung
- Schwankungen der UV-Strahlung
- Energiereiche Teilchen
- Kosmische Strahlung und Bewölkung

Die erste Hypothese erscheint nahe liegend, aber Satellitendaten zeigen, dass die Schwankungen der Gesamtstrahlung sehr klein sind, im Bereich von 0.1%. Der direkte Klimaeinfluss ist daher klein (entspricht den Beobachtungen am Erdboden). Möglicherweise gibt es wirkungsvolle Feedbacks, welche den Einfluss verstärken, beispielsweise eine Beeinflussung der Hadleyzirkulation oder der Häufigkeit von El Niño. Letzteres kann durch den „Thermostateffekt“ erklärt werden und wird auch von einfachen Modellen reproduziert.

Die Schwankungen im UV-Bereich sind mindestens eine Grössenordnung stärker und haben nachweislich Auswirkungen auf die Stratosphäre. Einige Autoren gehen deshalb davon aus, dass der Haupteinfluss der Sonnenaktivität auf Klimaschwankungen via eine Veränderung des stratosphärischen Ozons und der stratosphärischen Temperaturen erfolgt, ähnlich wie im Fall der Vulkanausbrüche (vgl. Fig. 51): Die entstehenden Temperaturgradienten beeinflussen die Zirkulation der Stratosphäre, was sich via Wave-mean flow interaction auf das Klima am Boden auswirkt. Klimamodelle zeigen mit veränderter UV-Strahlung zum Teil auch eine Veränderung der Aktivität planetarer Wellen. Allerdings würde dieser Effekt vor allem im Winter erwartet. Ein Signal des 11-jährigen Zyklus findet sich dagegen auch im Sommer.

Nochmals eine Grössenordnung stärker sind Schwankungen der energiereichen Partikel der Sonne. Einige Autoren sehen hier den eigentlichen Einfluss der Sonne auf das Klima. Wie der Mechanismus allerdings genau funktioniert, ist unklar. Unbestritten ist, dass sich Ereignisse wie Energetic Electron Precipitation events (EEP) und Solar Proton Events (SPE), welche bei Sonnenminima häufiger sind, auf die Stickstoffchemie der Mesosphäre auswirken, was zu einem Ozonabbau in der oberen Stratosphäre führt. Andere Autoren vermuten einen direkten Effekt.

Figur 60 impliziert eine Beziehung zwischen kosmischer Strahlung und der Bewölkung. Weil die kosmische Strahlung, welche die Erde erreicht, durch den Sonnenwind und damit durch die Sonnenaktivität moduliert wird, ist dies ein möglicher Kopplungsmechanismus zwischen Sonne und Erde. Es wurden mehrere Mechanismen formuliert, es ist jedoch unklar, wie realistisch dieser Einfluss ist.

3.6.7. Ozon und Klima

Der zweite Mechanismus (Sonneneinfluss via UV-Strahlung) führt über eine Veränderung des Ozons. Dasselbe müsste in ähnlicher Weise auch für andere Störungen des Ozonfelds gelten, zum Beispiel für die anthropogene Zerstörung der Ozonschicht, oder eine veränderte Dynamik der Stratosphäre. Die Fälle sind aber nicht genau gleich, da die räumliche Verteilung (Höhe, geographische Breite) in diesen Fällen anders ist.

Modellsimulation zeigen klar eine Abkühlung der Stratosphäre als Folge des Ozonabbaus. Gemäss Modell kann die starke Abkühlung der Stratosphäre (die auch beobachtet wurde) zu rund zwei Dritteln durch Ozonabbau und zu rund einem Drittel durch den negativen Temperatureffekt von CO_2 auf die Stratosphäre erklärt werden (Fig. 62).

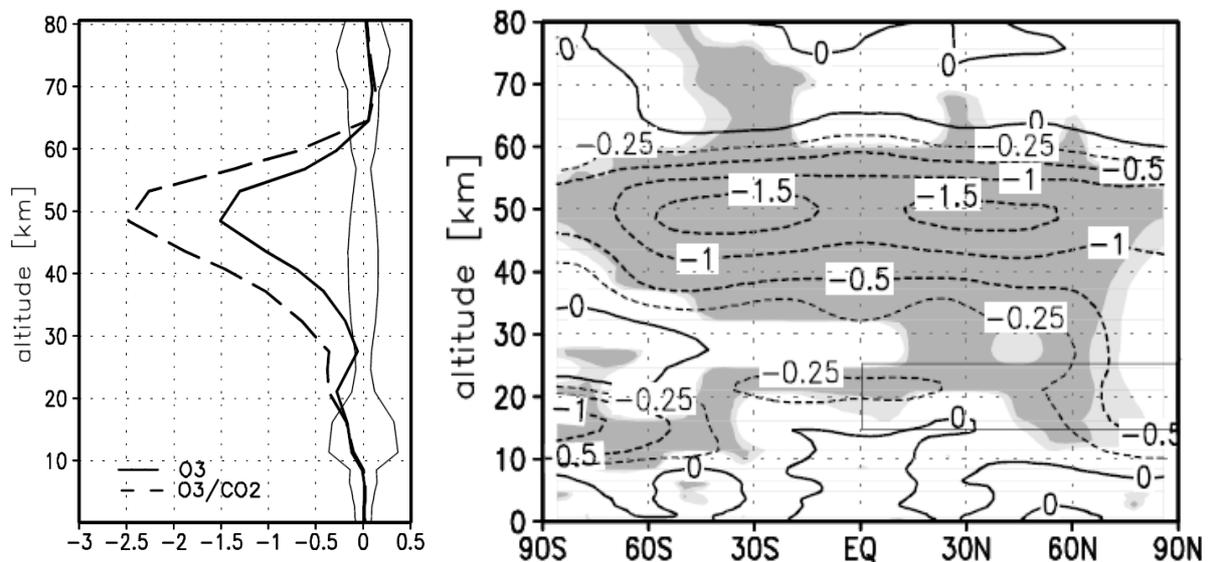


Fig. 62: Veränderung der Temperatur ($^{\circ}\text{C}/\text{Dekade}$, links: global, rechts: zonal gemittelt) bei Modellsimulationen mit veränderter Ozonschicht (O3) oder veränderter Ozonschicht und verändertem CO_2 (O3/CO2). Rechts: Simulation O3 (Langematz et al. 2003).

Durch den gleichen Mechanismus wie oben erwähnt kann sich daher der Abbau der Ozonschicht auch auf das Klima am Boden auswirken. So hat sich das Ozonloch über der Antarktis in einer Verstärkung des Polarwirbels ausgewirkt, was sich in einem positiveren Index der Antarctic Oscillation (oder Southern Annular Mode) äussert. Dies hat auch einen Einfluss auf die Temperaturentrends in der Antarktis (vgl. Kapitel 4.4).