

Der Einfluss der Sonne auf das Erdklima: Antworten auf die wichtigsten Fragen

1. Was versteht man unter Klima, was unter Wetter?

Luftdruck- bzw. Temperaturunterschiede und etliche andere Größen treiben komplizierte Prozesse an, die zum Teil zufällig und nur schwer vorhersagbar sind. Die resultierenden Wettererscheinungen wie Wind, Sonne, Regen, Hitze oder Kälte können wir mit unseren Sinnen wahrnehmen. All das hat aber zunächst nichts mit dem Klima zu tun. Erst wenn man Wetterdaten an einem Ort über einen Zeitraum von

mindestens 30 Jahren beobachtet und Durchschnittswerte vergleicht, erhält man Informationen über das lokale Klima. Das Erkennen eventueller Trends erfordert noch deutlich längere Beobachtungsreihen, und um globale Aussagen zu treffen, muss man auch räumlich mitteln. Ein Physiker hat einmal treffend bemerkt: „Klima ist das, was wir erwarten, Wetter ist das, was wir bekommen“.

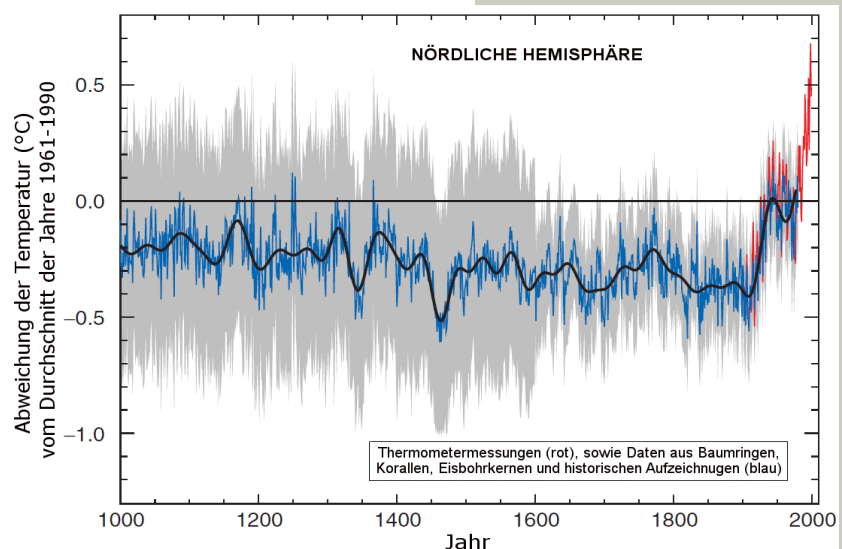
2. Verändert sich das Klima?

Ja. Das Klima ist ein komplexes System mit vielen Einflüssen, auf die es mit sich selbst verstärkenden Prozessen, Verzögerungen und Schwingungen häufig unvorhersehbar reagiert. Man weiß, dass es in der Vergangenheit immer wieder langfristige Klimatrends und langperiodische Wechsel von vielen tausend Jahren währenden Warm- und Kaltphasen gegeben hat, die von kurzzeitigeren Schwankungen überlagert wurden. Während über die früheren Jahrhunderte vor 1900 ein langfristiger leichter Abfall der Temperatur zu sehen war, steigt sie seither stark an (siehe Abbildung A). Viele Anzeichen wie schwindende Gletscher und weltweit steigende Meeresspiegel sowie globale Temperaturmessungen lassen keine Zweifel daran, dass sich das Klima in den letzten Jahrzehnten deutlich verändert hat. Das Jahrzehnt 2001-2010 war zum

Beispiel um ca. 0.2 C wärmer als das davor. Schon in seinem Bericht aus dem Jahr 2007 kam der Weltklimarat daher zu dem Schluss, dass die Erwärmung des Klimasystems außer Frage steht.

A Abweichung der Temperatur der letzten 1000 Jahre vom Durchschnittswert der Jahre 1961 bis 1990.

Bild: IPCC Report 3



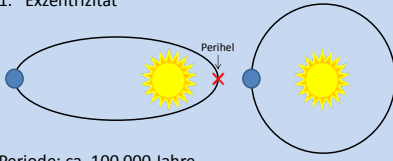
3. Welche Faktoren beeinflussen das Erdklima?

Ein wichtiger Faktor, der auf das Klima wirken kann, ist unsere Energielieferantin - die Sonne - und etwaige Änderungen ihres Strahlungsverhaltens. Aber selbst wenn man von einer konstanten Ausgangsenergie ausgeht, gilt es Mechanismen zu berücksichtigen, die auf die Menge und Zusammensetzung der an der Erdoberfläche empfangenen Energie einwirken, und die im folgenden näher beschrieben werden.

Der Erdborbit:

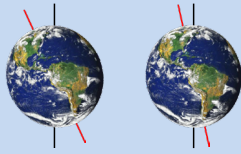
Die Geometrie der Erdbahn ist keineswegs so konstant wie oft angenommen. Die Abweichung von der Kreisbahn - von Astronomen als Exzentrizität bezeichnet - verändert sich ebenso wie die Neigung der Erdachse und die Lage des sonnennächsten Punktes, des Perihels. Die Veränderungen sind periodisch und überlagern sich. Derzeit erreicht die Erde ihren sonnennächsten

1. Exzentrizität



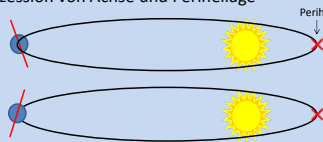
Periode: ca. 100 000 Jahre
Auswirkung: Einstrahlung im Perihel ca. 7 % erhöht

2. Achsenneigung



Periode: ca. 40 000 Jahre
Auswirkung: Wendekreise verschieben sich

3. Präzession von Achse und Perihellage

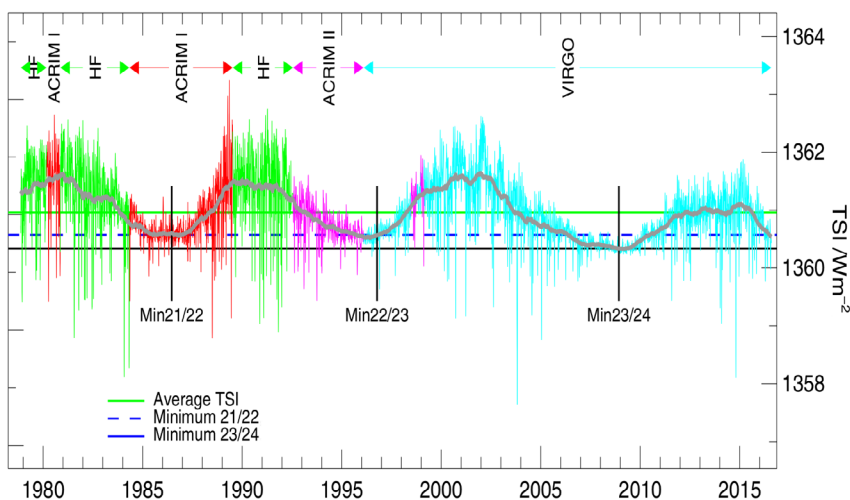


Periode: ca. 21 000 Jahre
Auswirkung: Halbjahr mit Perihel ca. 7 Tage kürzer

B Änderungen der Exzentrizität und der Neigung der Erdachse sowie die Präzession lassen die Verteilung des einfallenden Sonnenlichts variieren und führen so zu langfristigen Klimaänderungen.

C Sonnenstrahlung seit Beginn der direkten Messungen. Zu sehen sind sowohl Variationen mit dem 11-jährigen Sonnenzyklus als auch kurzfristige Schwankungen durch einzelne Sonnenfleckengruppen und Sonnenfackeln. Die mittlere Gesamthelligkeit ist durch die graue Kurve dargestellt. Die unterschiedlichen Farben zeigen Messungen mit verschiedenen Instrumenten.

Bild: PMOD



Punkt, bei dem es im Vergleich zu sonnenfernen Phasen zu einer um sieben Prozent erhöhten Einstrahlung kommt, in der ersten Januarwoche, also im Winter der Nordhalbkugel. In dieser Phase ist auch die Bahngeschwindigkeit der Erde erhöht, mit der Folge, dass der Nordwinter derzeit um etwa 7 Tage kürzer ist als der Sommer. In etwa 10000 Jahren werden beide Effekte stattdessen den Südwinter treffen.

Dass diese langfristigen Veränderungen wegen der ungleichen Verteilung von Land und Wasser auf den beiden Erdhalbkugeln klimarelevant sein können, hat der serbische Mathematiker Milankovic als erster erkannt. Die Kombination der von ihm genannten Effekte (dargestellt in Bild B) ist für die relative Stärke von Sommer und Winter verantwortlich und kontrolliert die Bildung und Abschmelzung von Eisschichten. Die Milankovic-Zyklen sind also eine wichtige Ursache langfristiger Klimaänderungen wie zum Beispiel Eiszeiten. Wegen ihrer langen Perioden können

4. Welche Art von Strahlung gibt die Sonne ab?

Im Zentrum der Sonne sind die Temperatur und der Druck so extrem, dass Atomkerne des Wasserstoffs zu Helium verschmelzen und dabei wie bei einem Fusionsreaktor enorme Energiemengen freisetzen. Diese Energie wird von der sichtbaren Oberfläche der Sonne meist in Form von Strahlung in das Weltall abgegeben. Da unsere Augen Strahlung nur als sichtbares Licht wahrnehmen können, erscheint die Sonne als eine hellgelb leuchtende Scheibe. Sie strahlt jedoch auch bei kürzeren und

diese Mechanismen aber keinesfalls für die schnelle Klimaänderung der letzten Jahrzehnte verantwortlich sein.

Vulkanausbrüche und andere Verunreinigungen der Atmosphäre:

Wie viel Strahlung die Erdatmosphäre passieren lässt und welche Komponenten das sind hängt davon ab, wie viele und welche Partikel sich in der Luft befinden. Vulkanausbrüche mit ihrem Ausstoß von Gas und Staub verändern das Transmissionsverhalten der Atmosphäre. Der Ausbruch des Tambora in 1815 bewirkte globale Klimaveränderungen mit der Folge von Missernten, Hunger und Migration. Zusätzlich zu den beschriebenen Effekten spielt die Zusammensetzung der Atmosphäre – vor allem die CO_2 -Konzentration, egal ob vom Menschen gemacht oder natürlich – eine Rolle. Auch die Änderung der Landnutzung hat unter Anderem aufgrund der veränderten Rückstrahlungsfähigkeit der Oberfläche einen Einfluss.

5. Strahlt die Sonne konstant?

Nein. Die Strahlungsleistung der Sonne ist kurzfristigen sowie langfristigen Schwankungen unterworfen, ebenso

längeren Wellenlängen, gibt also auch Ultraviolettes Licht (UV), Röntgenstrahlen, Infrarotstrahlung (IR), Mikrowellen und Radiowellen ab. Der allergrößte Teil der abgestrahlten Energie liegt im Bereich zwischen UV und dem fernen IR, hat also Wellenlängen zwischen 100 Nanometern und 0,1 Millimetern. Etwa 10 % der Energie entfallen auf das UV. Zusätzlich zur elektromagnetischen Strahlung gibt die Sonne auch den sogenannten Sonnenwind aus geladenen Teilchen ins Weltall ab.

wie die Zusammensetzung ihrer Strahlung. Verantwortlich dafür ist das solare Magnetfeld, das durch Strömungen im Sonneninneren erzeugt wird. Die Magnetfeldlinien sind an das heiße, elektrisch leitende Plasma gebunden und werden von ihm durch auf- und absteigende Strömungen in komplizierter Weise gedehnt und verzogen - wie Gummibänder in Honig, den man rührt. Steigen Magnetfeldbündel zur Oberfläche auf, verursachen sie dunkle Sonnenflecken, aber auch Sonnenfackeln – faserartige Aufhellungen, die heißer sind als ihre Umgebung. Sonnenflecken und -fackeln verursachen kurzfristige Schwankungen der Gesamthelligkeit der Sonne.

In einem Sonnenzyklus kommt es zu einem vermehrten beziehungsweise verminderten Auftreten von Sonnen-

flecken und -fackeln, so dass die Gesamtstrahlung der Sonne sich mit der elfjährigen Periode des Zyklus verändert. Im Mittel beträgt diese Schwankung 0.1% (graue Kurve in Abbildung C). Betrachtet man einzelne Wellenlängenbereiche, so kann die Variation aber sehr unterschiedliche Werte annehmen. So variiert die Intensität der UV Strahlung, die auf das Klima einen großen Einfluss hat, zum Beispiel [um einige zehn Prozent](#). Bei noch kürzeren Wellenlängen, wie im sogenannten

extremen UV, kann die Variation sogar über 100 Prozent betragen. Durch verschiedene Raumsonden gibt es seit etwa 40 Jahren Präzisionsmessungen der Gesamtstrahlung der Sonne. Die Einstrahlung, oder genauer: die Leistungsdichte, beträgt im Durchschnitt etwa 1361 Watt pro Quadratmeter. Diesen Wert bezeichnete man vor dem Satellitenzeitalter auch als „Solarkonstante“, da seine Schwankungen nicht messbar waren. Heute nennt man ihn dagegen „Total Solar Irradiance“ (TSI).

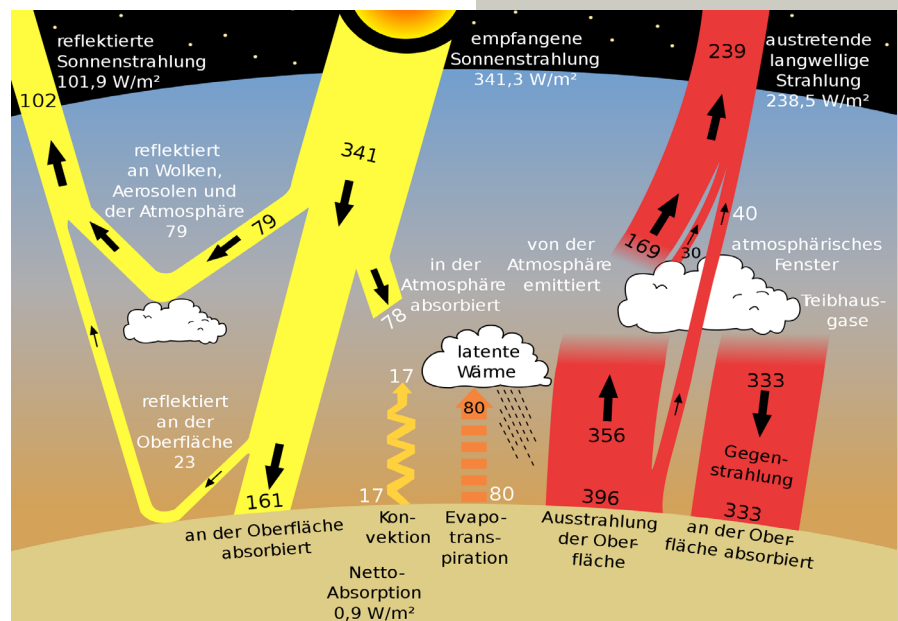
6. Wie kann die Sonne das Erdklima beeinflussen?

Der direkte Mechanismus ist der Energieeintrag der Sonne auf die Erde. Da die Atmosphäre Strahlung nur in bestimmten Wellenlängen durchlässt, erreicht nur ein Teil davon die Erdoberfläche und kann sie so erwärmen. Das ist etwa die Hälfte der Gesamtstrahlung, vorwiegend im sichtbaren Licht, während der Rest an Wolken, Aerosolen und durch Reflektion des Bodens zurückgestrahlt bzw. zurückgehalten wird. Die Atmosphäre wird durch die absorbierte Strahlung erwärmt. Im Infraroten gibt es Wellenlängenbereiche, bei denen die Atmosphäre durchlässig ist. Für andere Bereiche ist sie jedoch vollständig undurchlässig, weil hier Moleküle der Atmosphärgase die gesamte Strahlung absorbieren. Dies wirkt wie bei einem Treibhaus als Falle für Wärmestrahlung, ein Effekt, ohne den es auf der Erde etwa 32 °C kälter wäre.

Eine besondere Rolle kommt der UV-Strahlung zu – nicht nur durch die Erwärmung der Atmosphäre durch Absorption, sondern vor allem wegen der Beteiligung des UV an verschiedenen chemischen Reaktionen, zum Beispiel an denen, die für den Ozonhaushalt wichtig sind. So fördert die UV-Strahlung mit Wellenlängen unter 240 nm die Ozonbildung, während langwelligere UV-Strahlung für den Ozonzerfall verantwortlich ist. Die Variabilität der UV-Strahlung und die damit verbundenen Änderungen der atmosphärischen Chemie haben also einen großen Einfluss. So trägt die Strahlung bei unterschiedlichen Wellenlängen unterschiedlich viel Energie in die Troposphäre, die unterste Schicht der Atmosphäre, ein.

Ein anderer möglicher Mechanismus, der über das Magnetfeld der Sonne funktioniert, könnte auch indirekt das Klima beeinflussen: Kosmische Strahlung führt beim Eintreten in die Atmosphäre möglicherweise zu einer Zunahme von Wolken und zur Abkühlung der

Luft. Das Sonnenmagnetfeld bildet den so genannten Heliosphärischen Schild, der die Erde vor einem Teil dieser kosmischen Teilchen schützt. Ist die Sonne aktiv und ihr Magnetfeld daher stärker, funktioniert auch die Abschirmung besser. Der Zusammenhang zwischen der Bildung von Wolken und der galaktischen kosmischen Strahlung ist allerdings noch nicht bestätigt.



Ebenfalls nicht ganz geklärt ist der Einfluss der so genannten koronalen Massenauswürfe. Das sind Eruptionen der Sonne, die Plasmawolken und hochenergetische Teilchen gelegentlich auch in Richtung Erde aussenden. Treffen diese Teilchen auf Sauerstoff- und Stickstoffatome in den oberen Schichten der Erdatmosphäre, ionisieren sie diese, und es kommt unter anderem zu Polarlichtern und gelegentlich zu Störungen von Kommunikationssystemen und anderen technischen Einrichtungen. Ob dieses sogenannte Weltraumwetter auch einen Einfluss auf das Klima hat ist noch nicht vollständig geklärt. Ein Einfluss kann aber nicht ausgeschlossen werden, da eine Ionisierung der Atmosphäre auch deren Chemie beeinflusst.

D Strahlungshaushalt der Erde. Die Gesamteinstrahlung der Sonne ist in Gelb gehalten, langwellige Strahlung in Rot.

Bild: nach Kiehl & Trenberth (2009)

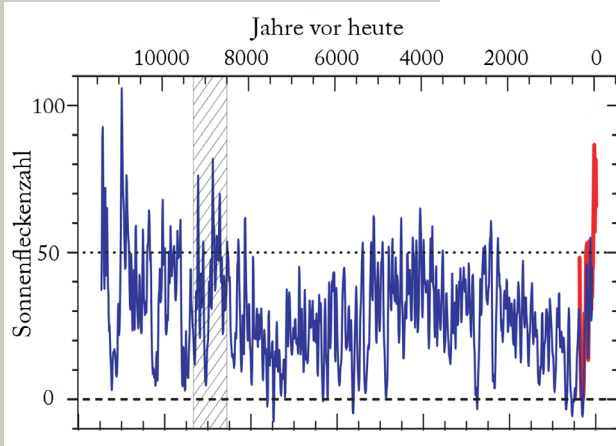
7. Lässt sich rekonstruieren, wie aktiv die Sonne in der Vergangenheit war?

Ja. Die Helligkeit der Sonne kann man zwar erst seit wenigen Jahrzehnten exakt messen, es gibt jedoch gute Anzeiger für die magnetische Aktivität, aus denen man die Strahlungsstärke rekonstruieren kann. Ein Beispiel dafür ist die Anzahl der Sonnenflecken.

keinen Zweifel daran, dass es während des [Maunder-Minimums](#) in manchen Regionen deutlich kühler war als davor und danach.

Die magnetische Aktivität der Sonne hat außerdem Spuren hinterlassen, die sich in die Vergangenheit zurückverfolgen lassen, zum Beispiel in Baumstämmen. Für Holz gibt es zwei etablierte Methoden der Altersbestimmung: die Baumringzählung und die C-14 Methode. Diese beruht auf der Annahme, dass die Höhenstrahlung gleichmäßig ist, und dass der Anteil an radioaktivem C-14 gleich ist, solange ein Organismus lebt. Das ist jedoch nicht der Fall.

Der Physiker Forbush hat erkannt, dass die am Boden gemessene Höhenstrahlung nach stärkeren Sonnenstürmen für einige Tage merklich abnimmt. Der C-14 Eintrag ist also nicht konstant, sondern antikorreliert zur Sonnenaktivität. Die Abweichung zwischen Baumringalter und C-14 Alter ist also ein Maß für die magnetische Aktivität und somit auch die Helligkeit der Sonne.



E Rekonstruktion der Sonnenfleckenanzahl durch Forscher des MPS. Daten, die anhand der C14-Methode gewonnen wurden, sind blau dargestellt, direkte Teleskopbeobachtungen ab 1610 zum Vergleich in rot.

Bild: Solanki et al (2004)

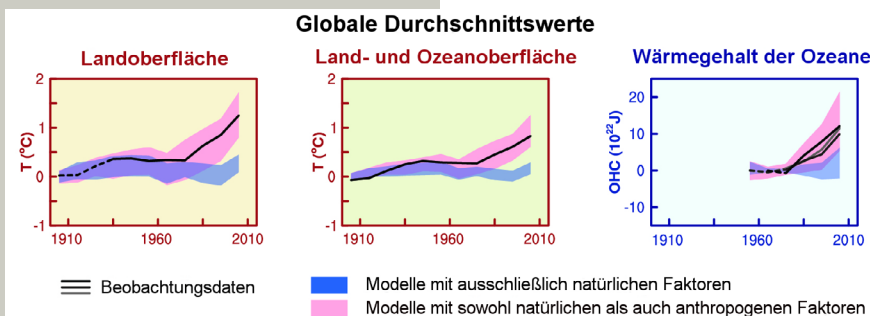
Systematische Sonnenfleckenanzahlungen gibt es seit der Erfindung des Fernrohrs, also etwa ab dem Jahr 1610. Kaum hatte Galileo über die Sonnenflecken berichtet, da blieben sie über ein halbes Jahrhundert fast vollständig aus. Die magnetische Aktivität der Sonne war zum Erliegen gekommen. Diese Periode bezeichnet man als das Maunder-Minimum. Obwohl es noch keine systematischen Wetterdaten gab, lassen andere Zeugnisse und Einträge in Chroniken

keinen Zweifel daran, dass es während des [Maunder-Minimums](#) in manchen Regionen deutlich kühler war als davor und danach.

8. Ist die Sonne für die globalen Klimaveränderungen der vergangenen Jahrzehnte verantwortlich?

Nein. Die Strahlungsleistung der Sonne sowie ihre Variation sind bekannt und können in Modellrechnungen berücksichtigt werden. Klimadaten bis zur ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts

lassen sich durch den Einfluss der Sonne und anderer natürlicher Quellen reproduzieren, nicht jedoch der Temperaturanstieg der letzten Jahrzehnte. Abbildung F zeigt Modellrechnungen für verschiedene Regionen der Erde über einen Zeitraum von 100 Jahren. Modelle, die ausschließlich natürliche Einflüsse berücksichtigen, sind blau dargestellt, und solche, die auch anthropogene Einflüsse beinhalten, in rot. Die Messdaten, die es zu reproduzieren gilt, sind als schwarze Linie gezeigt. Nur unter Berücksichtigung menschlicher Einflüsse lässt sich der Anstieg erklären.



F Modellrechnungen können die Beobachtungsdaten nur dann reproduzieren, wenn menschliche Einflüsse in die Berechnung mit einbezogen werden.

Bild: IPCC Report 5

9. Was ist der gegenwärtige Zustand der Sonne und wie geht es weiter?

Sonnenzyklen werden beginnend mit dem Zyklusmaximum des Jahres 1749 mit fortlaufenden Nummern versehen. Wir befinden uns derzeit im absteigenden Teil des Zyklus 24. Ihm ging eine ungewöhnlich lange Ruhephase voraus. Der aktuelle Zyklus hat sein Maximum bereits überschritten und ist nur etwa halb so stark wie der Vorgänger. Genaue Vorhersagen über Stärke und Dauer [kommender Zyklen](#) sind nicht möglich, da die Prozesse im Sonneninneren noch nicht genügend erforscht sind und teilweise zufällig ablaufen. Es ist möglich, dass die folgenden Zy-

klen schwach ausfallen, genauso gut kann ihre Stärke aber auch wieder zunehmen. Aber selbst wenn die Sonne weiterhin schwächeln sollte, heißt das nicht, dass die globale Erwärmung dadurch eingedämmt werden wird.

Werner Curdt, Natalie Krivova,
Elisabeth Guggenberger
Max-Planck-Institut für
Sonnensystemforschung
Justus-von-Liebig Weg 3
37077 Göttingen
<http://www.mps.mpg.de>