

Die Photosphäre der Sonne

Die Sonne ist ein gigantischer Gasball, der zum Großteil aus Wasserstoff und Helium besteht. Anders als bei festen Himmelskörpern, wie zum Beispiel der Erde, gibt es keine exakt definierte Oberfläche. Dennoch erscheint der Sonnenrand selbst durch große Teleskope betrachtet extrem scharf: Das sichtbare Sonnenlicht stammt nämlich aus einer nur 400 km dicken Schicht der Sonnenatmosphäre. Diese Schicht wird als Sonnenoberfläche oder Photosphäre bezeichnet.

Die auffälligsten Strukturen der etwa 5500 Grad Celsius heißen Photosphäre sind Sonnenflecken. Die systematische Aufzeichnung der Anzahl der Sonnenflecken begann

Anfang des 17. Jahrhunderts. Die so gewonnene Zeitreihe - die älteste, kontinuierliche wissenschaftliche Zeitreihe überhaupt - zeigt markante Schwankungen: etwa alle elf Jahre ist die Zahl der Sonnenflecken am größten, die Sonne befindet sich im Zustand hoher Aktivität.

Die Erforschung der Sonnenflecken und anderer Phänomene auf der Sonnenoberfläche stellen einen wichtigen Forschungsschwerpunkt am MPS dar. Dabei werden Beobachtungen mit theoretische Berechnungen verknüpft, um ein möglichst komplettes Verständnis der Prozesse auf unserem lebenspendenden Stern zu erhalten.

Beobachtungen

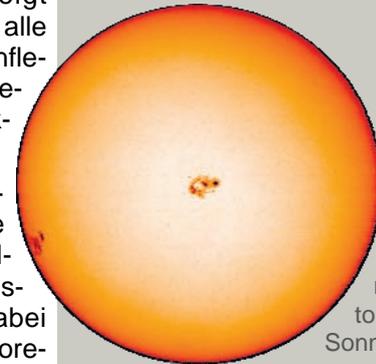
Als einzige Informationsquelle zur Untersuchung der Photosphäre steht den Wissenschaftlern am MPS das von der Sonne abgestrahlte, elektromagnetische Spektrum zur Verfügung. Das Sonnenspektrum erstreckt sich vom hochenergetischen Bereich der Gammastrahlung über den Bereich des sichtbaren Lichtes bis hin zum langwelligen Radiobereich. Atome in der Sonnenatmosphäre absorbieren selektiv Licht bestimmter Wellenlängen. Dies führt zur Entstehung der sogenannten Fraunhofer-Linien. Diese Linien transportieren Information über die physikalischen Bedingungen, wie Temperatur, Dichte, Magnetfeld oder Windgeschwindigkeiten, in verschlüsselter Form durch den Weltraum. Mit so genannten Spektrographen gelingt es, diese Informationen aus den Fraunhofer-Linien zu extrahieren und ein komplettes Abbild der Sonnenatmosphäre zu erstellen.

Die Lindauer Forscher bedienen sich dabei einer Vielzahl von Beobachtungsstationen. Weltraumteleskope wie die der japanischen Hinode-Raumsonde erlauben konti-

nuierliche, witterungsunabhängige Beobachtungen der Sonne auch in Bereichen des Spektrums, die durch die Erdatmosphäre ausgeblendet werden (zum Beispiel im UV-Licht). Bodengebundene Sonnentelkope sind mit besonders flexibler und moderner Instrumentierung ausgestattet und können aufgrund ihrer Größe die Weltrauminstrumente in punkto Auflösungsvermögen übertreffen. Eine Kombination der Vorteile von weltraumbasierten und bodengebundenen Teleskopen stellt das unter der Leitung des MPS durchgeführte Ballonprojekt Sunrise dar. Im Juni 2009 lieferte dieses von einem Ballon in 40 km Höhe getragene Teleskop Bilder von nur 70 km großen Strukturen auf der Sonnenoberfläche. Die Analyse dieser Daten wird das Verständnis der auf der Sonne ablaufenden Prozesse maßgeblich erweitern.



MAX-PLANCK-GESELLSCHAFT



Die Sonne im Weißlicht: die auffälligsten Strukturen der Photosphäre sind Sonnenflecken.

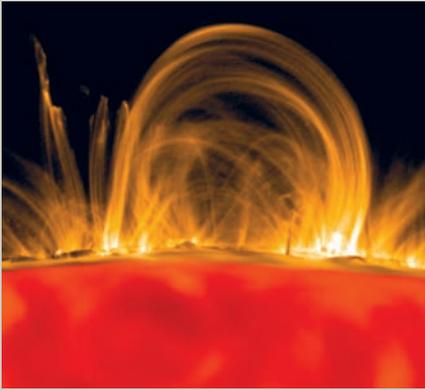


Sonnenbeobachtungen erfolgen mittels Weltraumteleskopen (Hinode, oben), bodengebundenen Teleskopen (Gregor, Teneriffa, links) und ballongetragenen Teleskopen (Sunrise, unten).

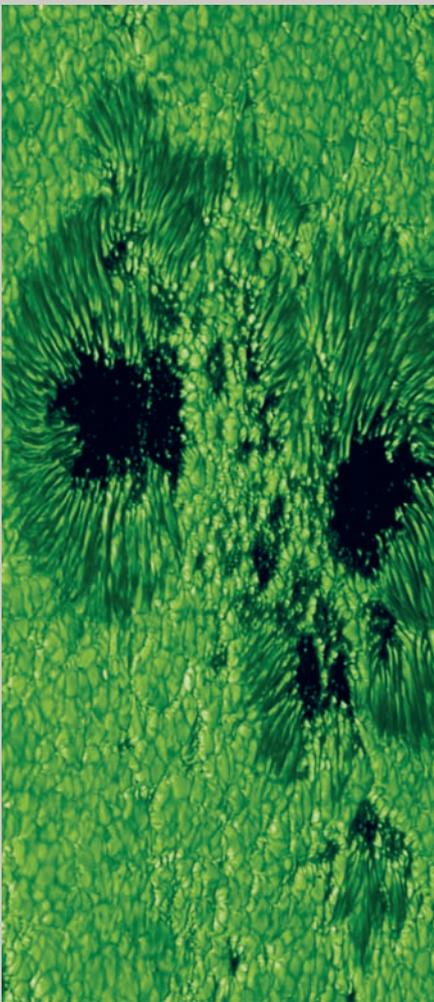


Die Fraunhofer Linien im Sonnenspektrum (unten) enthaltenen Information über die physikalischen Eigenschaften der Sonnenatmosphäre. Spektrographen an Sonnentelkopen machen das Sonnenspektrum für die Wissenschaftler sichtbar.





Magnetfelder, erzeugt durch einen Dynamoprozess im Sonneninneren, brechen durch die Sonnenoberfläche. Das koronale Plasma macht die Verbindung zwischen den beiden Magnetpolen sichtbar, ähnlich wie Eisenspäne bei einem Hufeisenmagneten.



Aktive Region in der Photosphäre: ein stark strukturierter Sonnenfleck zerfällt. Außerhalb des Sonnenfleckes ist das typische Granulationsmuster zu erkennen, hervorgerufen durch aufsteigendes, heißes Gas (Beobachtung durch MPS Wissenschaftler am Swedish Solar Telescope, La Palma).

Magnetfelder auf der Sonnenoberfläche

Die Untersuchung der Sonnenoberfläche mithilfe moderner Instrumentierung offenbart deren Vielfalt und Dynamik. Der größte Teil der Oberfläche besteht aus Granulen. Diese etwa 1000 km großen Zellen entstehen durch Aufsteigen von heißem Plasma, das an der Sonnenoberfläche abkühlt und in schmalen Kanälen wieder in tiefere Schichten absinkt. Das um etwa 1000 Grad kühlere Material lässt diese Kanäle im Vergleich zum etwa 5500 Grad Celsius heißen Zentrum der Granulen dunkler erscheinen - das typische Granulationsmuster entsteht. Das ständige Aufsteigen von neuem, heißem Plasma bewirkt eine kontinuierliche Veränderung dieses Musters innerhalb weniger Minuten.

Unterbrochen wird dieses Granulationsmuster von der auffälligsten Erscheinung auf der Sonnenoberfläche: den Sonnenflecken. In Zeiten hoher Sonnenaktivität sind diese dunklen Regionen mit einer Ausdehnung von bis zu mehreren Zehntausend Kilometern häufig sogar mit bloßem Auge, geschützt durch eine Sonnenfinsternisbrille, zu erkennen. Auch hier ist die im Vergleich zur Umgebung niedrige Temperatur in den Sonnenflecken bis zu 3500 Grad Celsius für deren geringe Helligkeit verantwortlich.

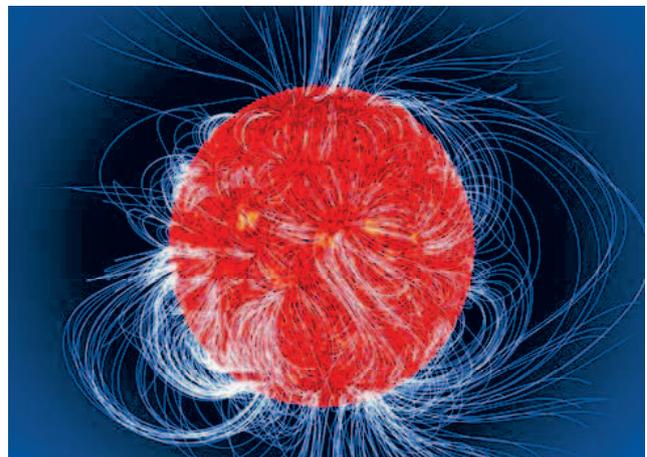
Der Grund für die Entstehung der Sonnenflecken liegt im Sonneninneren: Ein Dynamoprozess, hervorgerufen durch Plasmaströmungen, erzeugt starke Magnetfelder. Mit der zehntausendfachen Stärke des Magnetfeldes auf der Erdoberfläche brechen diese Felder in Form von magnetischen Flussröhren durch die Oberfläche. Diese starken Magnetfelder unterbinden die Konvektionsströmungen, die für das Aufsteigen des heißen Plasmas verantwortlich sind. Dadurch kühlt die Sonnenoberfläche dort

aus, der Sonnenfleck erscheint dunkel.

Sonnenflecken sind immer ein Teil von „Aktiven Regionen“. Häufig stellen sie einen Pol (Nord- oder Südpol) eines imaginären, gigantischen Magneten im Sonneninneren dar. Der zweite Pol kann entweder in Form eines weiteren Sonnenfleckes oder als so genannte Plage-Regionen, das sind auf größere Flächen verteilte Magnetfelder, an die Oberfläche treten. Diese Regionen sind als helle Gebiete auf der Sonnenoberfläche besonders gut nahe des Sonnenrandes zu beobachten.

Die ständige Umformung der Sonnenoberfläche durch die Konvektionsbewegung des heißen Plasmas verändert auch die magnetischen Strukturen in der äußersten Schicht der Sonnenatmosphäre, der Korona. Magnetfeldlinien können sich neu verbinden und dadurch große Mengen von Energie in und Materie freisetzen. Diese so genannten koronalen Massenauswürfe beschleunigen bis zu eine Milliarde Tonnen Plasma auf Geschwindigkeiten von über 2000 Kilometern pro Sekunde. Treffen diese Auswürfe auf die Erde entstehen geomagnetische Stürme, die zu Polarlichtern, zu Störungen im Funkverkehr oder sogar zur Zerstörung von Satelliten führen können.

Computermodelle erlauben die Berechnung des Magnetfeldes in der Korona der Sonne aus Beobachtungen in der Photosphäre.



Ein Blick in die Tiefe: Die Sonne im Computer

Fast alle Methoden, mit denen die Sonne beobachtet und ihre physikalischen Eigenschaften gemessen werden, liefern zweidimensionale Bilder und Karten, aber nur eine sehr beschränkte Tiefeninformation. Dies macht es sehr schwierig, die räumliche Struktur der physikalischen Prozesse, die den Erscheinungen auf der Sonne zu Grunde liegen, zu erfassen. Die rasante Entwicklung der Computertechnik hat es möglich gemacht, die fehlende Information durch Simulationsrechnungen auf Supercomputern zu ersetzen. Solche Simulationen gehen direkt von den physikalischen Grundgleichungen aus und verfolgen die räumliche und zeitliche Entwicklung der Strömungen des Sonnenplasmas und seines Magnetfeldes. Im Gegensatz zur Grafik bei animierten Filmen oder Computerspielen wird dabei nicht die Oberflächenerscheinung der Phänomene nachgebildet, sondern es werden die physikalischen Prozesse, die ihnen unterliegen, in ihrer gesamten Komplexität realistisch simuliert - als ob in den Figuren eines Computerspiels die ganzen Vorgänge eines menschlichen Körpers stattfinden würden.

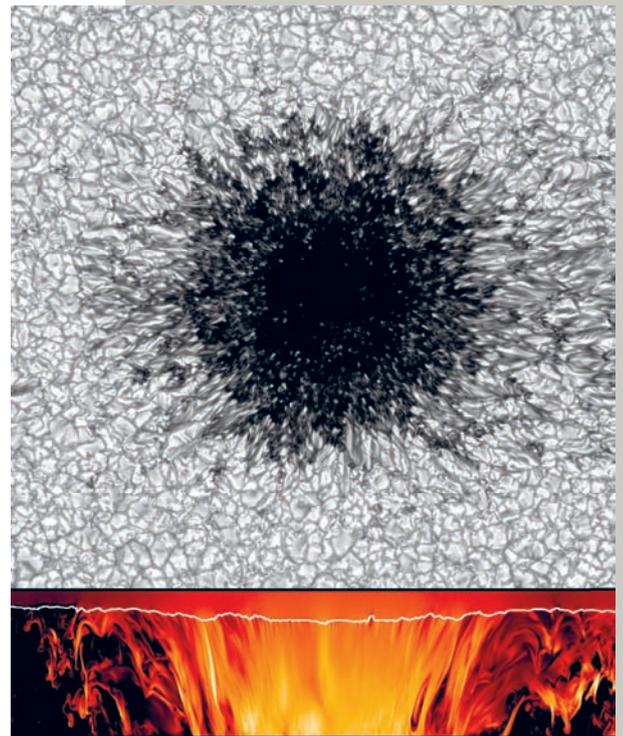
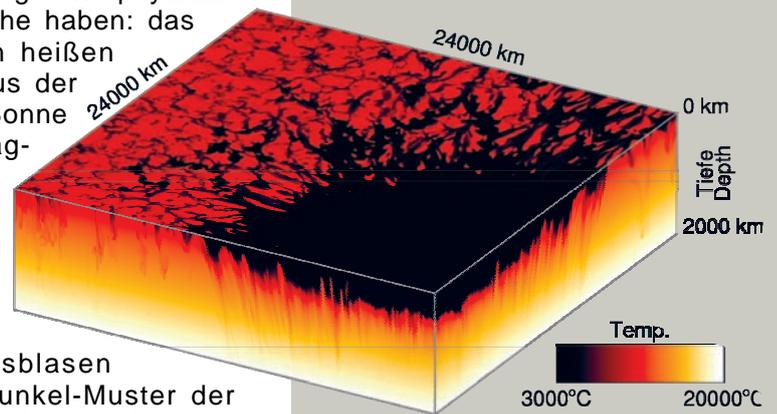
Aus den Simulationsergebnissen werden dann Bilder und Karten berechnet, die man mit Beobachtungsergebnissen vergleichen kann. Auf diese Weise kann die Qualität der Simulation geprüft werden. Aus der Übereinstimmung mit der Beobachtung kann man dann in der Simulation die physikalischen Prozesse ablesen, die zu den jeweils beobachteten Erscheinungen führen.

Das Zusammenspiel von Beobachtung/Messung und Simulation hat sich auf vielen Gebieten der Sonnenphysik als außerordentlich fruchtbar erwiesen. Ein Beispiel ist die Erforschung von Sonnenflecken. Über Jahrzehnte war rätselhaft, warum ihr dunkler Kernbereich (die Umbra) von hellen Punkten durchsetzt und von einer Pen-

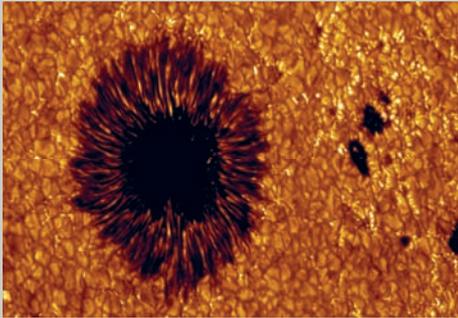
umbra aus helleren und dunkleren Fasern umgeben ist, in der ständig Plasma horizontal nach außen strömt. Im Zusammenspiel zwischen Beobachtungen und Simulationen zeigte sich, dass beide Phänomene die gleiche physikalische Ursache haben: das Aufströmen heißen Plasmas aus der Tiefe der Sonne entlang magnetischer Feldlinien. Außerhalb von Sonnenflecken rufen diese heißen Gasblasen das Hell-Dunkel-Muster der Granulation hervor. In der Fleckenumbra werden sie durch die starken magnetischen Kräfte zu dünnen Plasmastrahlen komprimiert, während sie in der Penumbra entlang horizontaler Feldlinien abgelenkt werden und nach außen strömen, so dass ein Muster heller und dunkler Fasern entsteht.

Solche Simulationsrechnungen erfordern leistungsfähige Supercomputer, in denen Tausende von Rechenprozessoren parallel arbeiten. So wird es möglich, ganze Sonnenflecken im Detail zu simulieren, aber auch das sie umgebende Granulationsmuster in seiner Wechselwirkung mit Magnetfeldern nachzubilden. Am MPS werden darüber hinaus auch Simulationen der Freisetzung magnetischer Energie und der Dynamik des Plasmas in der Sonnenkorona und im Sonnenwind durchgeführt. Simulationen sind zu einem zentralen Arbeitsfeld in der Sonnenphysik geworden.

Temperatur in einem Ausschnitt aus der Computersimulation eines Sonnenflecks. Die Tiefe von 0 km entspricht etwa der sichtbaren Sonnenoberfläche mit dem typischen Granulationsmuster außerhalb des Sonnenflecks. Unter der dunklen Umbra steigt das heiße Plasma in dünnen Strahlen („jets“) auf.



Computersimulation eines Sonnenflecks. Oben: sichtbare Struktur an der Sonnenoberfläche. Die dunkle Umbra, die faserige Penumbra und das umgebende Granulationsmuster sind kaum von realen Beobachtungen zu unterscheiden. Unten: Farbdarstellung des Magnetfeldes in einem vertikalen Schnitt durch die Simulation. Starke Magnetfelder sind durch helle Farben gekennzeichnet. Die weiße Linie stellt die sichtbare Oberfläche (Photosphäre) dar.



Ein Sonnenfleck, beobachtet mit dem Swedish Solar Telescope (La Palma): Das Zentrum des Flecks (Umbra) ist mit etwa 3500 Grad Celsius die kälteste Region der Photosphäre. Die radial nach außen gerichteten Strukturen nennt man Penumbra.

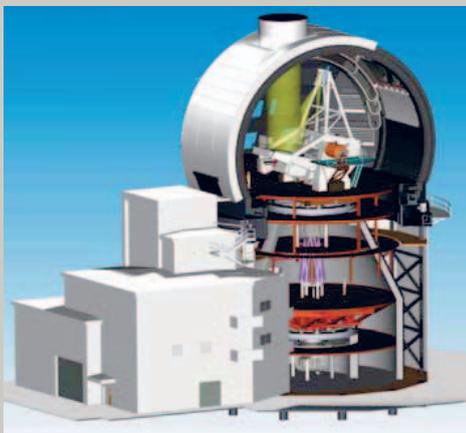
Ein Sonnenfleck im Detail

Erst mithilfe moderner Teleskope wird die Feinstruktur von Sonnenflecken sichtbar: Im dunklen Zentrum der Umbra zeugen so genannten „umbral dots“ von schwachen Konvektionsströmungen.

Die Umbra wird umgeben von einer Vielzahl von radial nach außen gerichteten Strukturen, der Penumbra. Entlang dieser radialen Strukturen strömt Plasma mit einer Geschwindigkeit von bis zu 6 Kilome-

tern pro Sekunde nach außen. Erst die am MPS durchgeführten Computersimulationen liefern eine mögliche Erklärung für diesen bereits 1909 durch den englischen Astronomen Evershed entdeckten Effekt.

Sonnenflecken haben eine typische Lebensdauer von bis zu 4 Wochen. Sie gehören damit zu den langlebigsten Strukturen auf der Sonnenoberfläche.



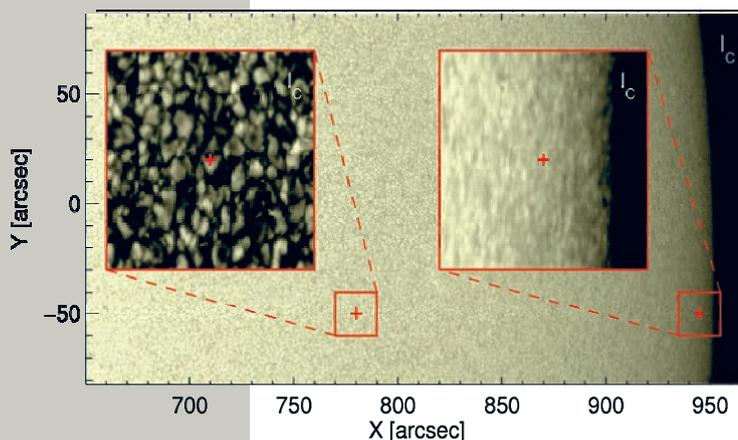
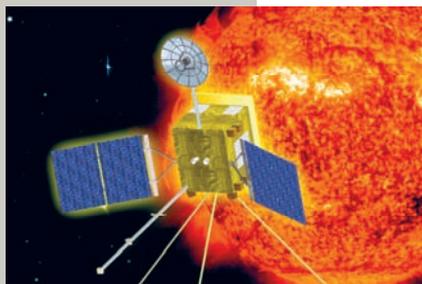
Amerikanische und europäische Sonnenphysiker arbeiten an der Realisierung von Sonnenteleskopen mit 3 bis 5 Meter großen Hauptspiegeln. Das amerikanische Projekt ATST (oben) soll am Mees Solar Observatory auf Hawaii entstehen.

Die Zukunft der Sonnenbeobachtungen

Die Resultate der theoretischen Modellrechnungen zeigen, dass sich viele für das Verständnis der Physik der Sonne relevanten Prozesse auf sehr kleinen Skalen abspielen. Um diese Prozesse beobachten zu können sind leistungsfähigere Teleskope notwendig. In einem europäischen Projekt arbeiten die Lindauer Wissenschaftler derzeit an der Planung für ein Sonnenteleskop der 4-Meter Klasse („European Solar Telescope“ - EST). Dieses Teleskop wird in der Lage sein, Strukturen von nur 25 km Ausdehnung auf der Sonne zu untersuchen. Die amerikanischen Sonnenphysiker arbeiten an einem ähnlichen Projekt: Mit Hilfe des „Advanced Technology Solar Telescope“ (ATST) sollen Photosphäre und Korona mit höchster räumlicher Auflösung untersucht werden.

Ein weiterer Schwerpunkt der zukünftigen Sonnenbeobachtungen stellen Weltraumteleskope dar. Die vom MPS vorangetriebene Mission „Solar Orbiter“ (geplanter Start: 2017) wird dabei in mehrfacher Hinsicht Neuland erforschen: Die spezielle Umlaufbahn um die Sonne erlaubt es der Raumsonde, über einen Zeitraum von zwei Wochen mit der Sonne zu „korotieren“, das heißt, die Instrumente haben immer die selbe solare Region unter dem selben Blickwinkel im Visier, und das aus einer Entfernung von nur einem Fünftel des Erde-Sonne Abstandes. Die Kombination aus Teleskopen in allen Wellenlängenbereichen mit Plasma- und Magnetfeldmessungen auf der Raumsonde wird ein detailliertes Bild der Sonnenatmosphäre von der Photosphäre bis zum interplanetaren Raum liefern. Die Umlaufbahn der Sonde wird im Laufe der Mission auch einen Blick auf die bisher kaum erforschten Pole der Sonne ermöglichen. Besonders wichtig sind diese Messungen an den Polen für Erkenntnisse über Strömungen im Sonneninneren, ein Schlüsselprozess zur Erklärung des Aktivitätszyklus der Sonne.

Die Raumsonde „Solar Orbiter“ wird die Sonne aus einer Entfernung von nur etwa 30 Millionen Kilometern beobachten. Die vorgesehene Umlaufbahn um die Sonne innerhalb der Merkurbahn erlaubt erstmals die detaillierte Sicht auf die Pole der Sonne: Die Abbildung rechts zeigt den Kontrastunterschied zwischen Polbeobachtungen von der Erde und von Solar Orbiter.



A. Lagg, M. Schüssler
Max-Planck-Institut für
Sonnensystemforschung
Max-Planck-Straße 2
37191 Katlenburg-Lindau
<http://www.mps.mpg.de>