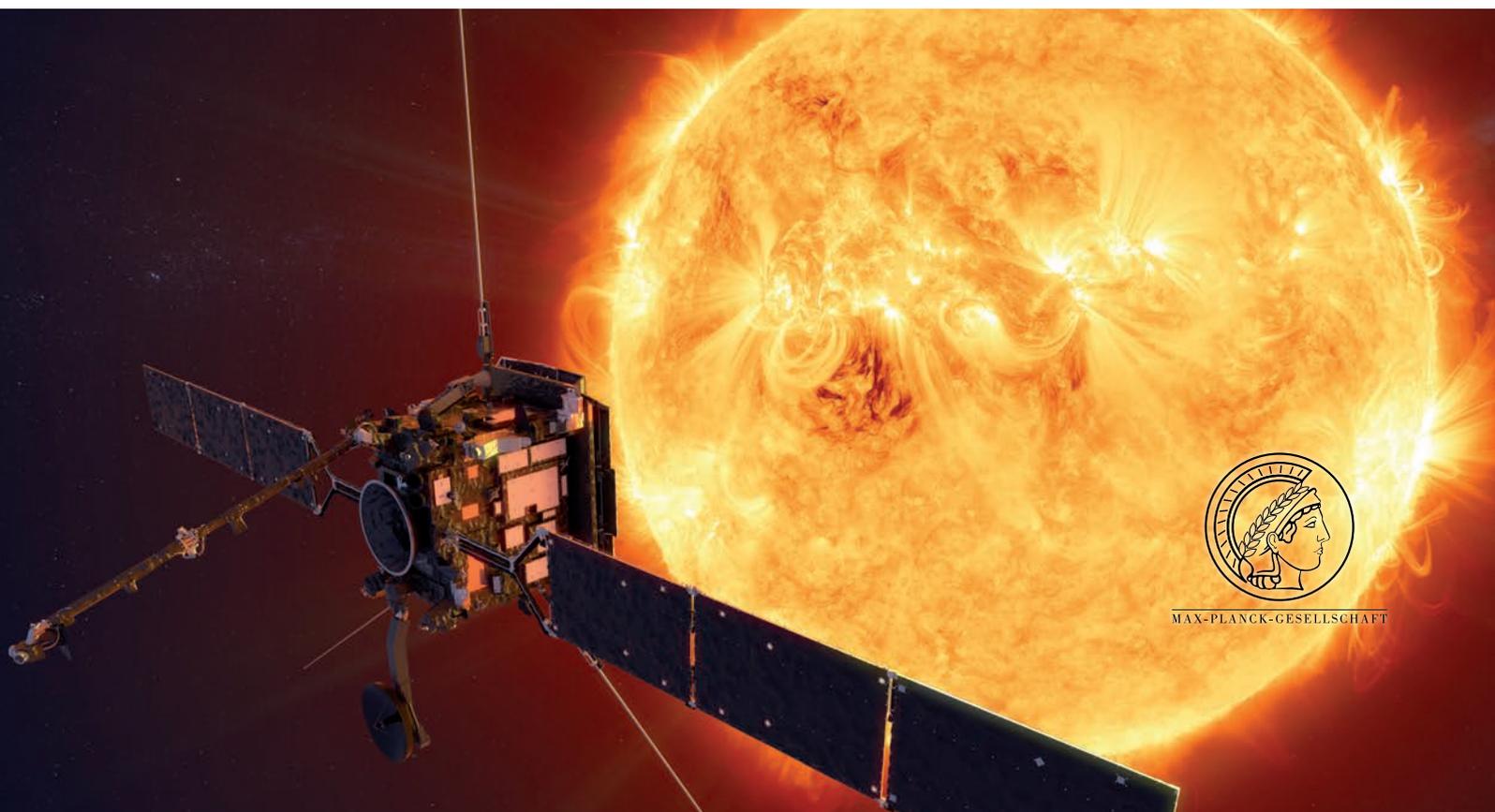


Solar Orbiter

EIN EINZIGARTIGER
BLICK AUF DAS SONNENFEUER



Eine Frage der Perspektive

Raumsonden, welche die Sonne aus dem Weltall erforschen, bleiben in der Regel in der Nähe der Erde, die meisten sogar in einer Erdumlaufbahn. Doch dieser Beobachtungsstandort bietet einen nur sehr eingeschränkten Zugang zu unserem Zentralgestirn. Was geschieht gerade auf der erdabgewandten Seite der Sonne? Wie sehen die Polregionen unseres Sterns aus? Wie entwickeln sich Strukturen auf der Sonne weiter, nachdem sie sich aus dem Sichtfeld der Erde gedreht haben? Und welche Eigenschaften haben die Teilchen, welche die Sonne kontinuierlich ins All sendet, an ihrem Entstehungsort? All diese Fragen lassen sich aus Erdnähe nicht beantworten.

Einen gänzlich anderen und deshalb einzigartigen Blick auf die Sonne genießt die Raumsonde Solar Orbiter. Im Februar 2020 startet die Mission der europäischen Weltraumagentur ESA, an der sich die amerikanische Weltraumagentur NASA maßgeblich beteiligt, ins All. In den folgenden Jahren schwenkt Solar Orbiter auf eine elliptische Umlaufbahn um die Sonne ein. Stellenweise werden die Raumsonde nur 42 Millionen Kilometer von der Sonnenoberfläche

trennen. Das ist nur wenig mehr als ein Viertel des Abstandes zwischen Sonne und Erde. Zudem verlässt Solar Orbiter nach und nach die Ebene, innerhalb der alle Planeten einschließlich der Erde um die Sonne kreisen. Die Sonde überfliegt somit Regionen auf der Sonne mit heliographischen Breiten von bis zu 33 Grad. So wird erstmals der Blick auf die bisher wenig erforschten Polregionen der Sonne frei.

Ausgerüstet ist Solar Orbiter mit insgesamt zehn wissenschaftlichen Instrumenten. Während vier von ihnen die elektromagnetischen Felder und die Sontenteilchen, die die Sonde vor Ort umströmen, vermessen, schauen sechs andere auf Umgebung, Atmosphäre und Oberfläche der Sonne. Eines davon ist sogar in der Lage, Informationen über das Innere der Sonne zu sammeln. Durch diesen zehnfachen Blick auf die Sonne und ihre nähere Umgebung wird es möglich, unterschiedlichste Regionen und Phänomene unseres Sterns wie nie zuvor zueinander in Beziehung zu setzen – von den gewaltigen Plasmaströmen im Innern unseres Sterns über die wechselhaften Magnetfelder an seiner Oberfläche und die Energieentladungen in seiner heißen Atmosphäre bis zu den Sonnenwindteilchen, die er mit ungeheurer Energie ins All schleudert.

Zusammenspiel aus Instrumentierung und Flugbahn

Das Besondere von Solar Orbiter liegt nicht in einer einzigen Eigenschaft. Die Mission ist nicht die erste, die sich nah an die Sonne heranwagt oder ihre Pole erforscht. Sie ist auch nicht die erste Mission, die eine Vielzahl von Instrumenten auf unseren Stern richtet. Dennoch eröffnet die Mission völlig neue Möglichkeiten.

Durch das einzigartige Zusammenspiel aus umfangreicher Instrumentierung und völlig neuartiger Flugbahn kann Solar Orbiter Antworten auf die wichtigsten ungeklärten Fragen der Sonnenphysik finden: Wie gelingt es der Sonne, den Sonnenwind ins All zu schleudern? Warum ist die Korona, die äußere Sonnenatmosphäre, mit mehr als einer Million Grad so viel heißer als die darunter gelegene Oberfläche der Sonne? Diese erreicht gerade einmal Temperaturen von etwa 6000 Grad. Welche Prozesse im Magnetfeld der Sonne sind dafür verantwortlich? Und wie entsteht dieses Magnetfeld tief im Innern unseres Sterns? Um diese Fragen zu beantworten, liefert Solar Orbiter den bisher umfassendsten Blick auf die Sonne.



Die Stärken von Solar Orbiter

1. Sonnennähe:

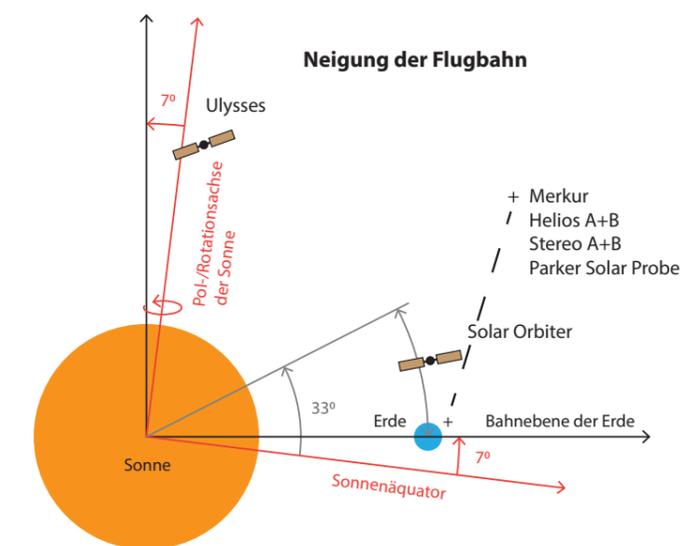
Nur wenige Weltraummissionen haben sich bisher innerhalb die Umlaufbahn des Merkurs gewagt. Die ersten, denen dieses Kunststück gelang, waren Mitte der 70er Jahre die Sonden Helios-A und Helios-B, ein gemeinsames Projekt der westdeutschen und der amerikanischen Weltraumorganisationen DFVLR und NASA. Auch das MPS war maßgeblich beteiligt. Die Helios-Sonden untersuchten zwar ähnliche Fragestellungen wie Solar Orbiter, waren jedoch mit deutlich weniger Messinstrumenten ausgerüstet. Da sie sich zur Lageregulierung um die eigene Achse drehten, fehlte insbesondere die Möglichkeit, Aufnahmen der Sonne zu machen.

Den Rekord für den geringsten Abstand zur Sonne hält die NASA-Mission Parker Solar Probe. Die Mission startete 2018 ins All; 2024 soll sie sich der Sonne sogar bis auf knapp 6 Millionen Kilometer annähern. Parker Solar Probe und Solar Orbiter ergänzen einander und werden ihre Messungen abstimmen: Parker Solar Probe

fliegt näher an die Sonne heran; Solar Orbiter trägt mehr wissenschaftliche Instrumente an Bord. Insbesondere muss Parker Solar Probe ohne Instrumente auskommen, die die Sonne abbilden. In solcher Nähe zur Sonne lassen sich solche Kameras und Teleskope nicht betreiben. Solar Orbiter wird so der Parker Solar Probe ihre „Augen“ leihen und zeigen, durch welche Strukturen die Probe gerade fliegt.

2. Stereo-Blick auf die Sonne:

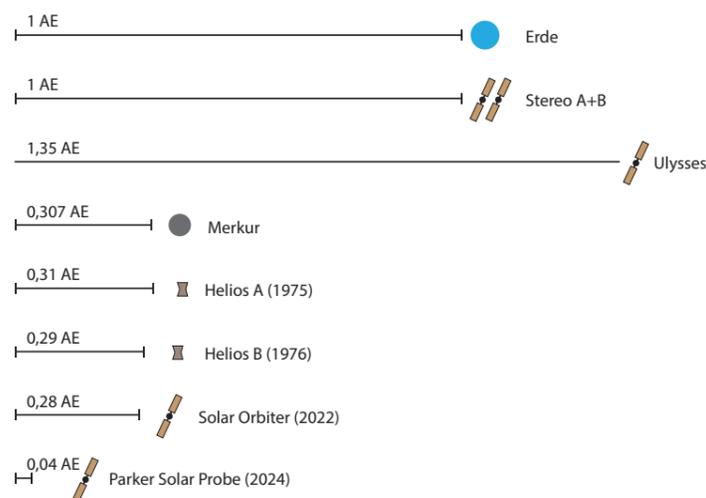
Mit Solar Orbiter wird ein Rundum-Blick auf die Sonne möglich. Dafür arbeitet Solar Orbiter mit erdgebundenen Sonnenteleskopen oder Sonden in Erdnähe zusammen. Während diese auf die Sonnenseite schauen, die der Erde gerade zugewandt ist, blickt Solar Orbiter im Vorbeiflug auf die Rückseite. Beide Perspektiven lassen sich zu einem vollständigen Bild der Sonne zusammenfügen. Ähnlich gingen die Zwillingssonden STEREO A und B vor, die von 2006 bis 2016 von unterschiedlichen Positionen auf der Erdumlaufbahn mit Teleskopen auf die Sonne schauten. So gelang erstmals eine dreidimensionale Abbildung der Sonnenkorona. Jedoch reichte die Instrumentierung nicht aus, um die Quellregionen der Sonnenaktivität detailliert zu untersuchen. MPS-Forscherinnen und Forscher waren an zwei der Instrumenten beteiligt.



3. Blick auf die Pole:

Ein weiterer Wegbereiter für Solar Orbiter war die Raumsonde Ulysses, zu der das MPS wesentlich beitrug. Als erste Sonde verließ sie die Bahnebene der Erde. In der Zeit von 1994 bis 2008 flog Ulysses insgesamt dreimal über die Polregionen der Sonne. Allerdings blieb die Sonde dabei weit außerhalb der Umlaufbahn der Erde – und verfügte ebenfalls über keine abbildenden Instrumente.

Sonnennächster Punkt



1 AE = 149,6 Millionen Kilometer = mittlerer Abstand zwischen Sonne und Erde

Zeitplan der Mission

Feb. 2020
Start

26. Dez. 2020
erster Venusvorbeiflug

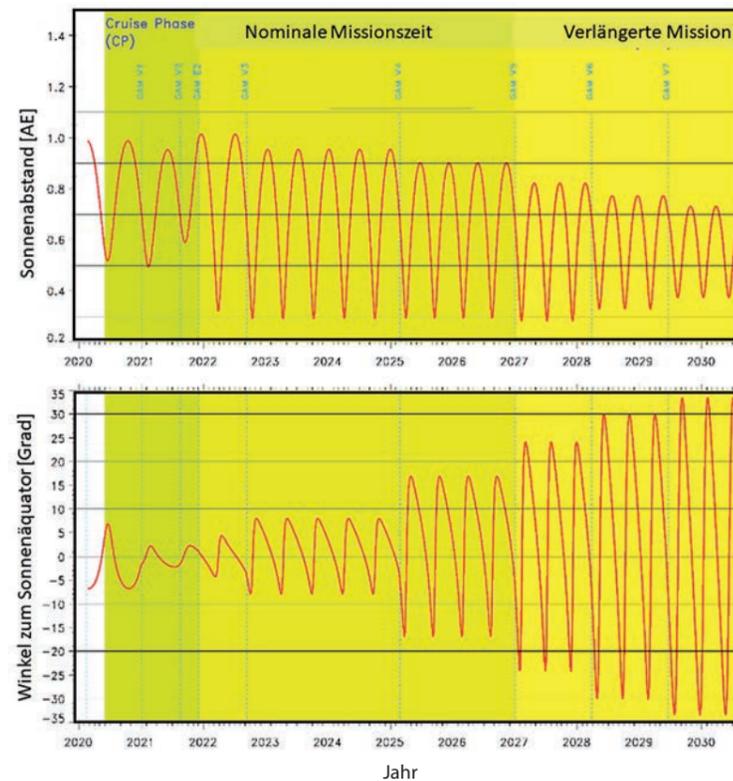
8. Aug. 2021
zweiter Venusvorbeiflug

26. Nov. 2021
Erdvorbeiflug und danach
Beginn des vollständigen
wissenschaftlichen Betriebs

Okt. 2022
erstes Erreichen des
sonnennächsten Punktes

Jan. 2027
Beginn der erweiterten
Mission

Auf der ellipsenförmigen Umlaufbahn schwankt der Abstand, der Solar Orbiter von der Sonne trennt, in regelmäßigen Abständen (oben). Durch Vorbeiflüge an der Venus erhält die Sonde genug Energie, um sich der Sonne zu nähern und schrittweise höhere heliographische Breiten der Sonne zu überfliegen (unten).



Auf Ellipsen um die Sonne

Mindestens sieben Jahre soll die einzigartige Entdeckungsreise von Solar Orbiter dauern. Danach ist eine dreijährige Verlängerung geplant. Im Februar 2020 startet die Sonde an Bord einer Atlas V 411-Rakete vom Kennedy Space Center bei Cape Canaveral (Florida). Bis die erste vollständige Messkampagne beginnt, vergehen allerdings zunächst fast zwei Jahre. In dieser Zeit nutzt Solar Orbiter den Schwung aus Vorbeiflügen an Erde und Venus, um auf die richtige, stark elliptische Umlaufbahn um die Sonne einzuschwenken. Sobald diese erreicht ist, umrundet Solar Orbiter die Sonne einmal alle 168 Tage. Am sonnennächsten Punkt trennen die Sonde 0,28 AE (Astronomische Einheit = Abstand zwischen Sonne und Erde) von der Sonne; im sonnenfernsten Punkt 1 AE. Messungen finden vor allem in den sonnennahen Phasen statt.

Die sonnenfernen Phasen ermöglichen der Sonde regelmäßige Vorbeiflüge an der Venus. Diese Begegnungen geben der Sonde jeweils den nötigen Schwung, um die Bahnebene der Planeten schrittweise zu verlassen. Nach fünf Jahren wird die Flugbahn um 17 Grad gegen den Sonnenäquator geneigt sein, nach zehn Jahren sogar um 33 Grad.

So trotz Solar Orbiter dem Sonnenfeuer

Obwohl die Raumsonde selbst am sonnennächsten Punkt noch 42 Millionen Kilometer von der Sonne trennen, muss sich Solar Orbiter auf einen heißen Arbeitsplatz einstellen. An der sonnenzugewandten Seite werden bis zu 500 Grad Celsius erwartet.

Um seine Subsysteme und vor allem die Instrumente vor solcher Hitze zu schützen, gleicht Solar Orbiter an seiner Sonnenseite einer Art fliegendem Schutzschild: zwanzig Schichten aus hitzebeständigem Titan sowie eine spezielle, hitzeabsorbierende schwarze Beschichtung stellen sich der Sonnenglut in den Weg. Ein Großteil der Hitze wird dort abgestrahlt und kann so die kritischen Systeme und Messinstrumente nicht erreichen.

Die vier Instrumente, die den Sonnenwind direkt vermessen, sind im Schatten des Hitzeschildes vor den hohen Temperaturen geschützt. Die Fernerkundungsinstrumente hingegen brauchen Sichtkontakt zur Sonne. Sie blicken durch möglichst kleine „Gucklöcher“ im Hitzeschild, die sich bei Bedarf schließen lassen.

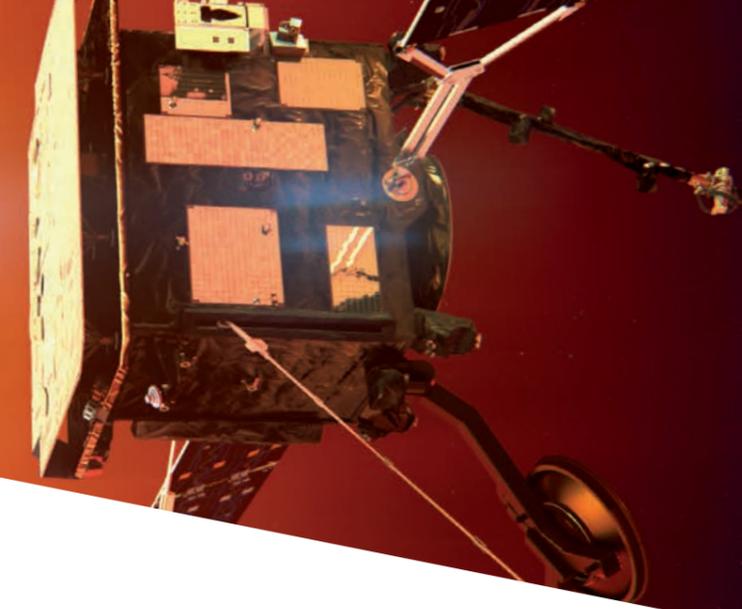
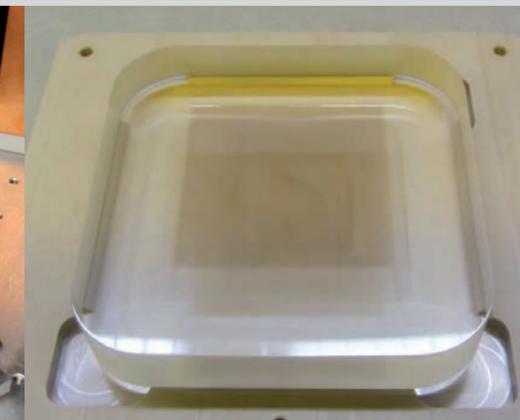
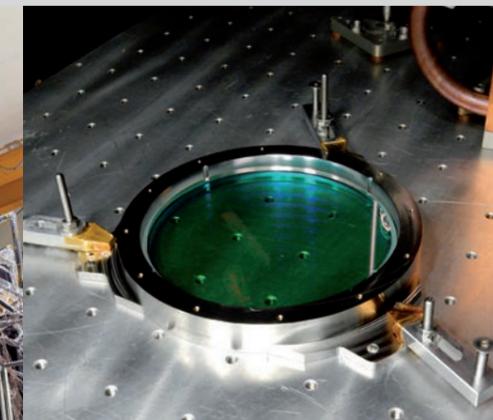
Während der Messungen schützen spezielle Eintrittsfenster, die einen Großteil der Sonnenstrahlung reflektieren, die meisten von ihnen vor dem Überhitzen. Die Fenster des Doppelteleskops PHI etwa bestehen aus zwei Scheiben, von denen die erste hochfrequente, die zweite niederfrequente Teile des Sonnenlichtes reflektiert. Nur ein kleiner Wellenlängenbereich des roten Lichtes, insgesamt nur 4 Prozent der Gesamtstrahlung der Sonne, können passieren. Auf diese Weise operiert PHI selbst im sonnennächsten Punkt der Flugbahn bei maximal 50 Grad Celsius.

Nur das Instrument SPICE nutzt eine andere Strategie: Das Sonnenlicht darf dort ungehindert ins Instrument eintreten. Ein am MPS eigens entwickelter Spiegel, der für Licht fast aller Wellenlängen durchsichtig ist, erlaubt dem Großteil der Strahlung, das Instrument ungenutzt zu durchqueren – ohne es aufzuheizen. Lediglich ein kleiner Teil des ultravioletten Lichtes wird am Spiegel reflektiert und einem Spektrographen zugeleitet. Die Temperaturen im Innern erreichen so nicht mehr als 80 Grad Celsius. So trotz Solar Orbiter dem Sonnenfeuer.

Das Hitzeschild von Solar Orbiter besteht aus mehreren Lagen Titan und einer schwarzen Beschichtung. Die geschlossenen Gucklöcher für die Fernerkundungsinstrumente sind hier im oberen Bereich des Hitzeschildes zu sehen.

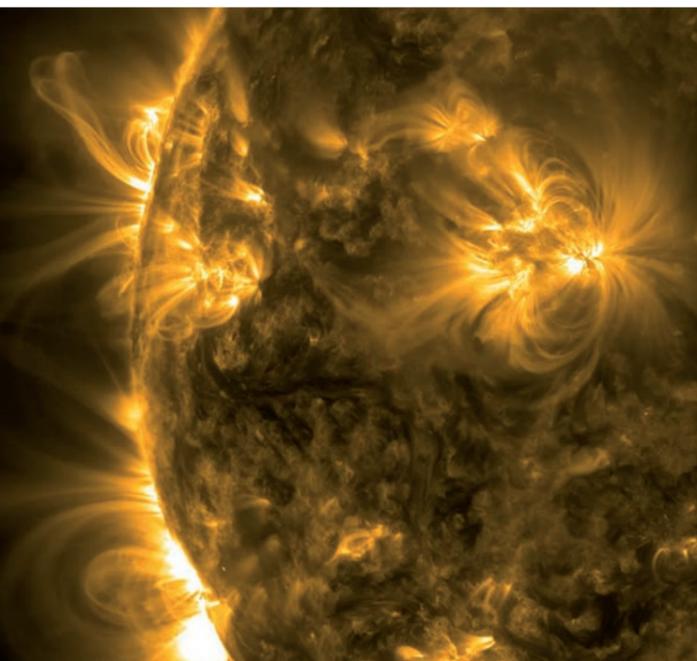
Das Eintrittsfenster von PHI lässt nur einen kleinen Teil des roten Sonnenlichtes passieren.

Der Spiegel von SPICE ist für fast alle Wellenlängen durchsichtig. Sie durchqueren das Instrument, ohne es aufzuheizen.



Unser magnetischer Stern

Die Magnetfelder der Sonne sind der Schlüssel zu ihrem temperamentvollen und dynamischen Wesen. Die Unmengen von Teilchen, die unser Stern teils



Zu den auffälligsten magnetischen Strukturen der Sonne gehören die koronalen Bögen. Heißes Plasma fließt dort entlang der magnetischen Feldlinien.

explosionsartig, teils kontinuierlich ins All schleudert; die riesigen, bogenförmigen Plasmaflüsse in der Korona; die dunklen Flecken, die sich mal mehr, mal weniger zahlreich an der Oberfläche unseres Sterns zeigen – alle diese Phänomene sind Ausdruck des komplexen und veränderlichen Magnetfeldes unseres Sterns. Es entsteht tief in seinem Innern. Von dort werden die magnetischen Strukturen an die Oberfläche geschwemmt, durchbrechen diese und setzen sich bis in die Atmosphäre der Sonne und die Heliosphäre fort. Sie sind das Prinzip, das all diese Schichten und Regionen der Sonne mit einander verbindet. Mit seiner Vielzahl wissenschaftlicher Instrumente ist Solar Orbiter in der Lage, dem solaren Magnetfeld von seinem Ursprung im Innern der Sonne bis zu den Feldern, die der Sonnenwind ins All trägt, nachzuspüren.

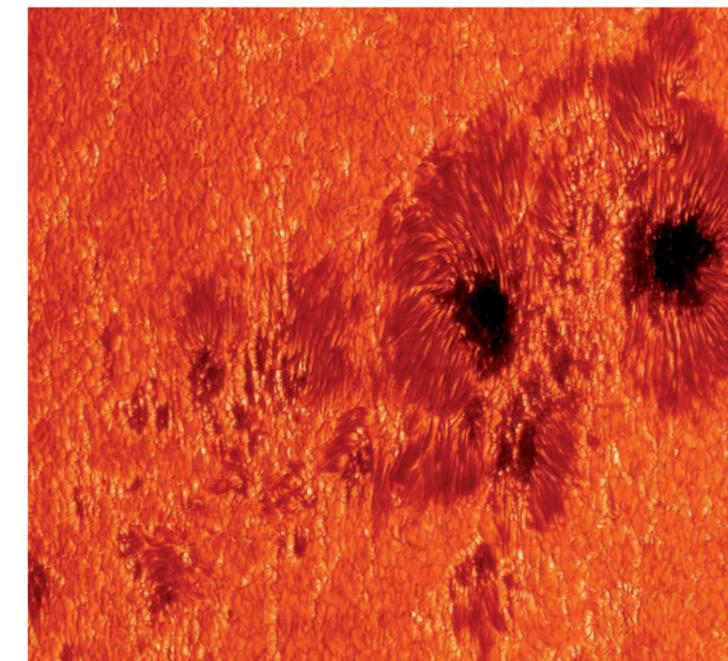
Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler hoffen, auf diese Weise auch das Rätsel der Koronaheizung zu lösen: Warum ist die äußere Atmosphäre der Sonne mit einigen Millionen Grad so viel heißer als die darunterliegende Photosphäre? Dort herrschen Temperaturen von gerade einmal 6000 Grad. Wie die Sonne die erforderliche Energie aus den tieferen Schichten in die Korona transportiert, ist noch unklar. Sicher ist nur, dass hier magnetische Phänomene eine entscheidende Rolle spielen.

Der magnetische Rhythmus der Sonne

Das großräumige Magnetfeld der Sonne gleicht dem eines Stabmagneten. An der Oberfläche ist es im Mittel etwa doppelt so stark wie das der Erde. Diesem vergleichsweise übersichtlichen Feld sind kleinere, schneller veränderliche und hochkomplexe magnetische Strukturen überlagert. Die Kleinsten sind nur etwa 100 Kilometer groß. Stellenweise kann die Magnetfeldstärke mehr als 8000-fach über dem irdischen Wert liegen.

Das Magnetfeld der Sonne unterliegt einem etwa 22-jährigen Zyklus: Im Mittel alle 11 Jahre polt sich das globale Magnetfeld der Sonne um. Aus dem magnetischen Nordpol wird dann der Südpol und anders herum. Auch andere magnetische Phänomene folgen diesem Rhythmus. Ein Beispiel sind etwa die Sonnenflecken, dunkle Regionen hoher magnetischer Feldstärke auf der sichtbaren Oberfläche der Sonne. Etwa alle elf Jahre im so genannten Sonnenfleckenmaximum treten sie gehäuft auf. Im Minimum hingegen sind oftmals über mehrere Monate keine Sonnenflecken zu sehen. Zu Beginn eines Zyklus erscheinen die Sonnenflecken in den mittleren Breiten der Nord- und Südhalbkugel. Im weiteren Verlauf entstehen sie immer näher am Äquator.

Meist finden sich Sonnenflecken in Paaren mit entgegengesetzter magnetischer Polarität, wobei die Pole überwiegend in gleicher Orientierung in Ost-West-Richtung angeordnet sind. Alle 11 Jahre kehrt sich diese Anordnung um.



Aus der Nähe betrachtet zeigen Sonnenflecken eine filigrane Feinstruktur. Im Zentrum sind die Magnetfelder am stärksten. Dort kann heißes Plasma nicht aufsteigen; der Fleck erscheint dunkel.

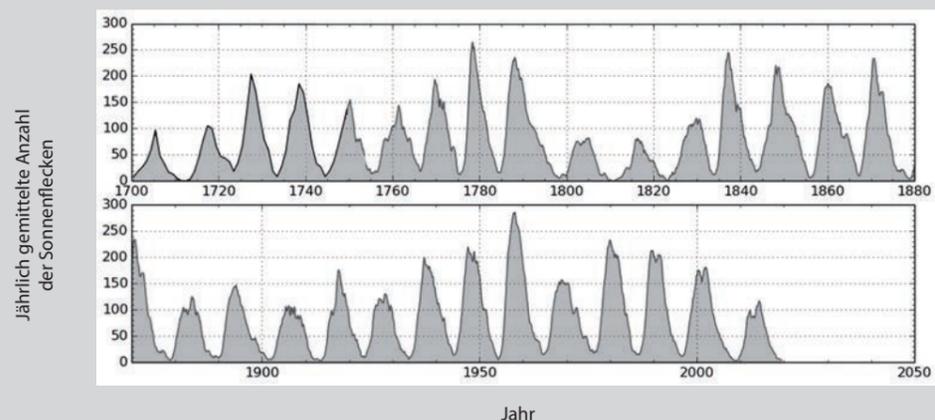
Der Sonnenzyklus

In regelmäßigen Abständen zeigt sich die Sonne von ihrer dynamischen Seite: Viele Sonnenflecken überziehen ihre Oberfläche, es kommt vermehrt zu Sonneneruptionen und die Gesamtstrahlungsleistung der Sonne ist höher. Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler nennen diese Phase das Aktivitätsmaximum der Sonne. Zwischen solchen Maxima kommt die Sonne zur Ruhe. Ein solcher Zyklus dauert

im Mittel elf Jahre; es können im Einzelfall aber auch neun oder gar vierzehn sein.

Als geeignetes Maß für die Aktivität der Sonne hat sich die Anzahl der Sonnenflecken erwiesen. Diese wird seit mehr als dreihundert Jahren systematisch aufgezeichnet.

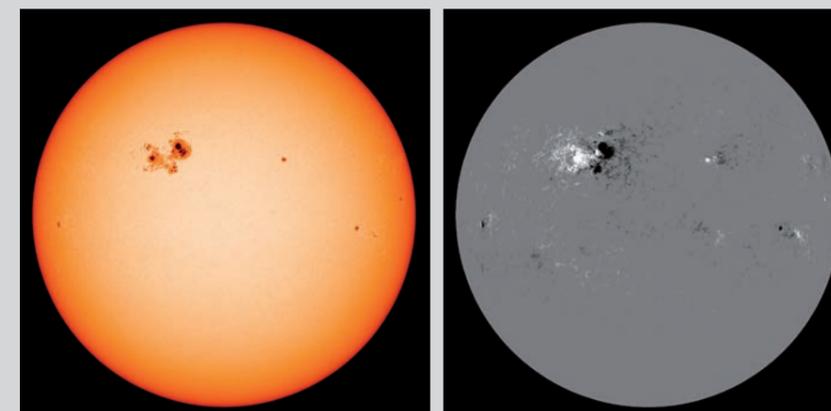
Die Polarität des Sonnenmagnetfeldes unterliegt einem 22-jährigen Rhythmus.



Magnetogramm der Sonne

Sonnenflecken sind dunkle Bereiche auf der sichtbaren Oberfläche der Sonne (linkes Bild). Magnetogramme (rechtes Bild) stellen die dazugehörigen Magnetfeldstärken dar und entsprechen somit „magnetischen Landkarten“ der Sonne.

Wie sich hier zeigt, treten Sonnenflecken meist in Paaren mit entgegengesetzter Polarität auf. Manche Flecke sind so groß, dass sie sogar von der Erde ohne Teleskope zu sehen sind.

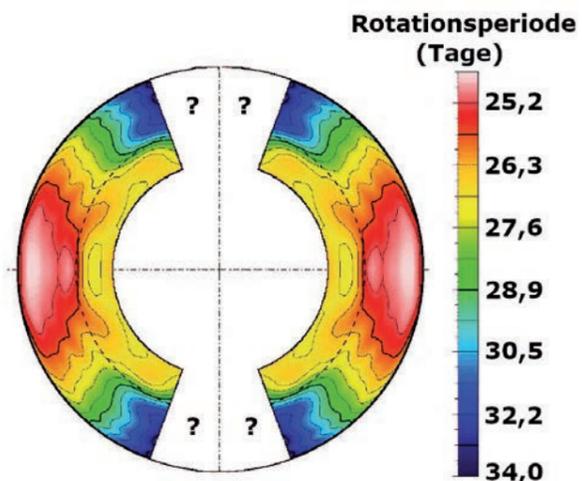


Der Ursprung der Magnetfelder

Wie die Magnetfelder der Sonne genau entstehen, ist noch unklar. Höchstwahrscheinlich ist ihr Geburtsort der Grenzbereich zwischen Strahlungs- und Konvektionszone, genannt Tachocline. Während die Sonne in der Strahlungszone wie eine starre Kugel rotiert, ist die Drehbewegung in der darüber gelegenen Konvektionszone komplexer: Regionen verschiedener Breite rotieren mit verschiedenen Geschwindigkeiten. Dadurch entstehen starke Scherbewegungen. Zudem ist die Konvektionszone Schauplatz gewaltiger Plasmaumwälzungen: Angetrieben von der Hitze im Innern der Sonne steigt das Sonnenplasma nach oben, kühlt dort ab und sinkt wieder hinab. Durch die komplexe Drehbewegung des elektrisch geladenen Plasmas werden die Auf- und Abströme verdrillt und verdreht; es entstehen Magnetfelder. In einer Art Dynamoprozess verstärken sie sich selbst und erzeugen so das komplexe, stellenweise ebenfalls stark verdrillte und verdrehte Magnetfeld der Sonne. Zudem ist möglicherweise ein zweiter, kleinskaligerer Dynamo am Werk, der etwa durch turbulente Strömungen in oberflächennahen Schichten entsteht.

Die magnetischen Felder, welche die sichtbare Oberfläche der Sonne stellenweise durchbrechen, werden auf einer Art solarem „Förderband“ über die Sonne transportiert. Gewaltige, oberflächennahe Ströme, die in Nord-Süd-Richtung verlaufen, schwimmen die Felder vom Äquator zu den Polen hin, wo sie sie mit in die Tiefe reißen. Diese Umwälzungen bilden die Grundlage des Sonnenzyklus.

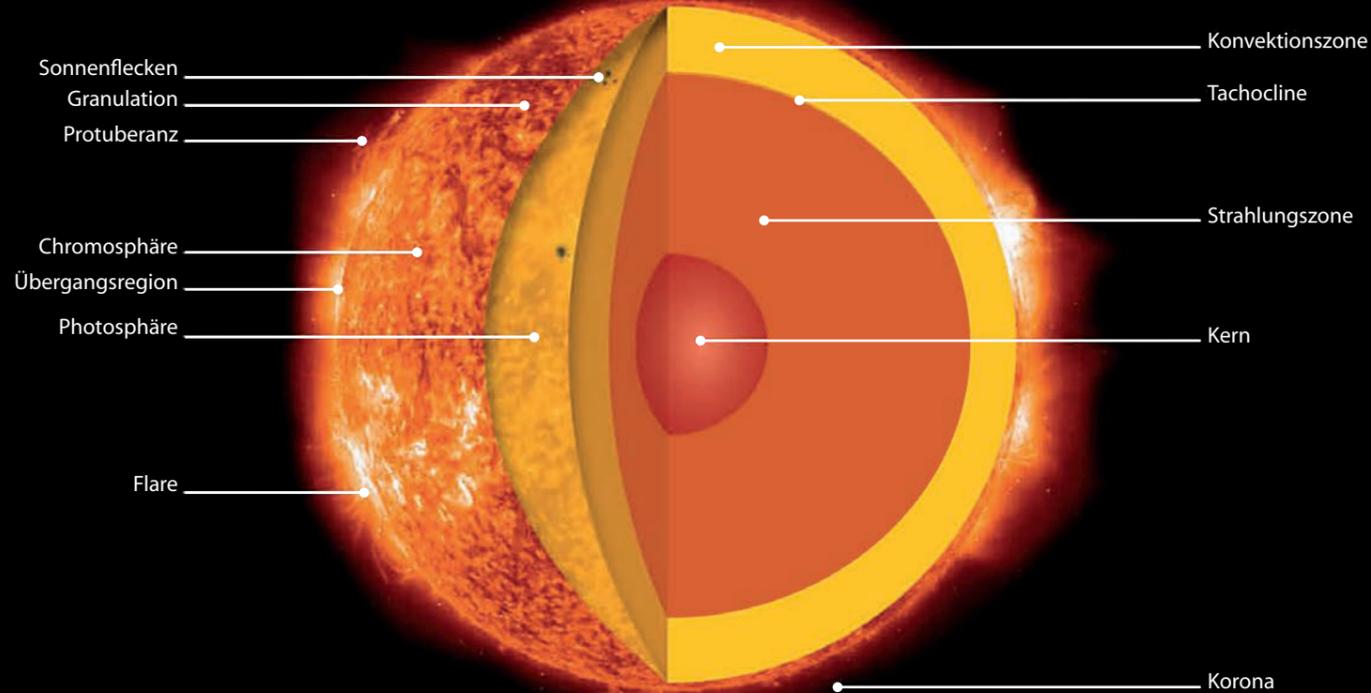
Die gewaltigen Plasmaumwälzungen in der Konvektionszone der Sonne zeigen sich an der sichtbaren Oberfläche der Sonne in einem charakteristischen Muster, der Granulation. Dies ist sozusagen der Normalzustand der Sonnenoberfläche, der mit nur schwachen Magnetfeldern einhergeht. Die einzelnen Granulationszellen sind einige tausend Kilometer groß und nur wenige Minuten stabil. Im hellen Innern steigt das heiße Plasma aus der Tiefe nach oben, an den dunkleren Rändern sinkt es wieder hinab. Die magnetischen Feldlinien konzentrieren sich an den dunklen Rändern.



In der Strahlungszone tief im Innern rotiert die Sonne mit einer nahezu konstanten Geschwindigkeit. In der Konvektionszone weiter außen hängt die Rotationsperiode stark von der heliographischen Breite ab. Die Polregionen sind in dieser Hinsicht noch unerforscht.

Das fehlende Puzzleteil

Zum genauen Verständnis von Sonnendynamo und Sonnenzyklus fehlen detaillierte Messdaten aus den Polregionen unseres Sterns. Wegen des sehr flachen Blickwinkels, der sich von der Bahnebene der Erde aus ergibt, sind viele Phänomene, die anderswo auf der Sonne bereits gut erforscht sind, dort noch unverstanden. Dies trifft etwa ebenso auf die genaue Gestalt und Stärke der Magnetfelder an der Oberfläche zu wie auf die Rotationsgeschwindigkeit der Sonne. Und auch genaue Informationen über das solare Förderband liegen aus dieser Region nicht vor. Erst Solar Orbiter kann aus seiner einzigartigen Beobachtungsposition neue, detaillierte Messdaten liefern – und so die fehlenden Puzzleteile zum Verständnis unseres magnetischen Sterns.



Aufbau der Sonne

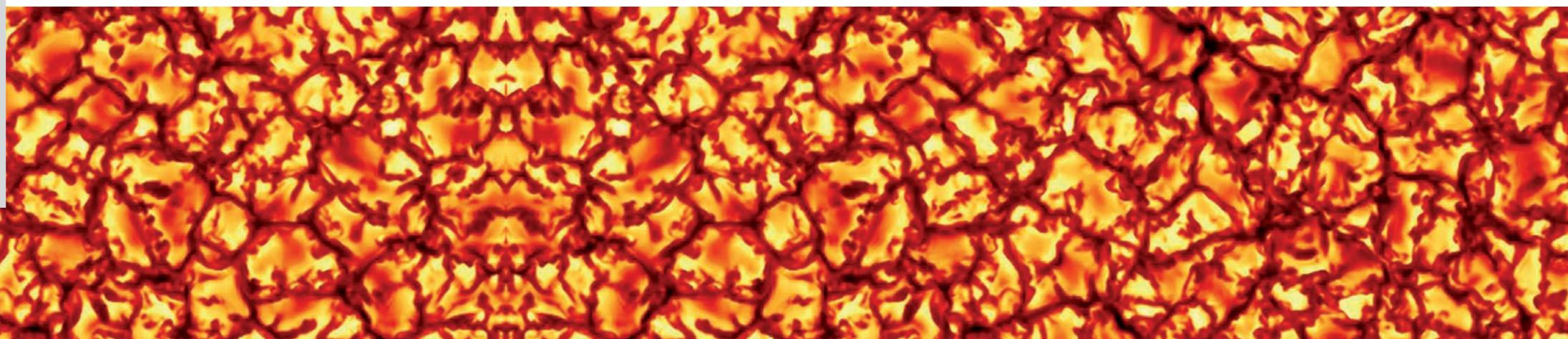
Die Sonne ist zwiebelartig in mehreren Schichten aufgebaut. Im Kern der Sonne sind Druck und Hitze so groß, dass Wasserstoffatomkerne zu Heliumatomkernen verschmelzen.

Die Kernfusion setzt gewaltige Energiemengen frei, die sich zunächst in Form von Strahlung ihren Weg durch das heiße Sonnenplasma nach außen bahnt. Diesen Bereich bezeichnet man als Strahlungszone. In der weiter außen gelegenen Konvektionszone ist das Plasma bereits dünner. Angetrieben von der Hitze im Innern steigt es nach oben, kühlt ab und sinkt wieder hinab. Die Schicht zwischen Strahlungs- und Konvektionszone wird als Tachocline bezeichnet. Sie gilt als Ursprung der komplexen Magnetfelder der Sonne. Diese gewaltigen Auf- und

Abströme aus dem Innern zeigen sich an der sichtbaren Oberfläche der Sonne, der Photosphäre, als großporiges Granulationsmuster. Dort finden sich zudem - je nach Aktivität der Sonne - die dunklen Sonnenflecken.

Weiter außen bilden das sehr dünne Plasma der Chromosphäre und der deutlich heißeren Korona die Atmosphäre der Sonne. Zwischen diesen beiden Regionen liegt die Übergangsregion, innerhalb derer die Temperaturen sprunghaft von etwa 7000 Kelvin auf eine Million Kelvin ansteigen.

In der Atmosphäre der Sonne kommt es zu verschiedenen dynamischen Phänomenen wie etwa Flares und Protuberanzen.



Ein umfassender Blick auf den Sonnenwind zusammengesetzt aus Aufnahmen von bodengebundenen Teleskopen und Raumsonden während der Sonnenfinsternis vom 21. August 2017.

Sonnenteilchen mit rätselhaften „Antrieb“

Durchschnittlich eine Million Tonnen Masse spuckt die Sonne pro Sekunde ins Weltall, das meiste davon in Form geladener Teilchen wie etwa Elektronen, Protonen und den Kernen von Heliumatomen. Zudem lassen sich geringe Mengen weiterer Atomkerne nachweisen: Kohlenstoff, Stickstoff, Sauerstoff, Neon, Magnesium, Silizium, Schwefel und Eisen. Gelegentlich geschieht dies in heftigen Ausbrüchen, so genannten koronalen Massenauswürfen: Innerhalb kurzer Zeit schleudert die Sonne explosionsartig gewaltige Teilchenmengen ins All. Treffen diese auf das Magnetfeld der Erde, kommt es zu Sonnenstürmen, die sich in hohen geographischen Breiten als Nordlichter zeigen und im schlimmsten Fall sogar Satelliten lahmlegen und zu Stromausfällen führen können. Bei einigen dieser Ausbrüche werden SEPs freigesetzt. Die Abkürzung steht für solare energetische Partikel und bezeichnet Teilchen, die mit nahezu Lichtgeschwindigkeit von der Sonne wegrasen.

Daneben gibt es den Sonnenwind, einen nie abreißen Teilchenstrom von der Sonne, der allerdings je nach Aktivität unseres Sterns mal stärker und mal schwächer ausfällt. Mit einem irdischen Wind hat dieses Phänomen wenige Gemeinsamkeiten. Zum einen ist die Teilchendichte im Sonnenwind eher vergleichbar mit der in einem Ultrahochvakuum: Auf Höhe der Erde tummeln sich gerade einmal 5 Millionen Sonnenwindteilchen auf einem Kubikmeter. Zum anderen jagt der Sonnenwind mit Geschwindigkeiten von 300 bis 750 Kilometern pro Sekunde durchs All – und somit deutlich schneller als sich Druckwellen in dem dünnen Plasma ausbreiten können.

Ursprungsort des Sonnenwindes sind bestimmte Regionen in der äußeren Atmosphäre der Sonne, der Korona, mit ihren geradezu unvorstellbaren Temperaturen von mehr als eine Million Grad Celsius. Diese dünne Plasmahülle ist in vielerlei Hinsicht rätselhaft. Wie gelingt es der Sonne, die Korona derart aufzuheizen? Schließlich erreichen die Temperaturen in der darunter gelegenen Photosphäre nur einige tausend Grad Celsius. Welche physikalischen Prozesse versorgen die äußerste Sonnenhülle mit der nötigen Energie? Und wie hängt dies alles mit dem Sonnenwind zusammen?

Ursprungsorte an den Polen und am Äquator der Sonne

Diese Fragen soll Solar Orbiter mit seinem einzigartig umfassenden Blick auf die Sonne beantworten. Fest steht, dass allein die gewaltigen Temperaturen in der Korona nicht ausreichen, um die Sonnenwindteilchen mit Überschallgeschwindigkeiten ins All zu katapultieren. Viel deutet darauf hin, dass magnetische Vorgänge Korona und Sonnenwindteilchen mit der nötigen Energie versorgen.

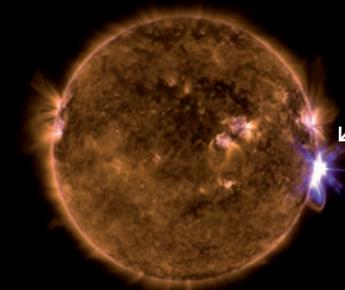
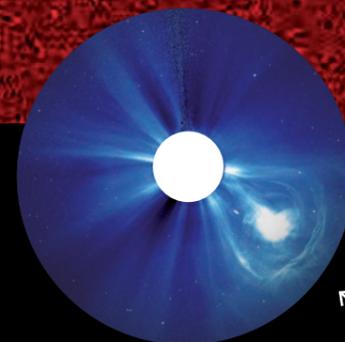
Dafür spricht etwa ein genauer Blick auf die Entstehungsorte des Sonnenwindes: Besonders schnelle Teilchen, die als schneller Sonnenwind bezeichnet werden, treten vor allem im Aktivitätsminimum der Sonne aus so genannten koronalen Löchern in den Polregionen der Sonne aus. In diesen Regionen ragen die Feldlinien des Sonnenmagnetfeldes weit in den Weltraum hinein und erlauben es den Teilchen vergleichsweise leicht zu entweichen. Wegen der geringeren Plasmadichte sind diese Regionen kühler und erscheinen dunkler als ihre Umgebung. Langsamere Teilchen, der so genannte langsame Sonnenwind, verlassen die Sonne während des gesamten Sonnenzyklus, bevorzugt aus Äquaturnähe. Dort bilden die Magnetfeldlinien kleinere Bögen; das Sonnenplasma ist stärker gebunden.

Die Fernerkundungsinstrumente von Solar Orbiter blicken in verschiedene Schichten der Sonne: von der heißen Korona über die darunter gelegene kühlere Chromosphäre bis hinunter zur Photosphäre, der sichtbaren Oberfläche der Sonne. Nur so lässt sich nachspüren, welche Prozesse in der Lage sind, den ständigen Sonnenwind, die gelegentlichen koronalen Massenauswürfe und die sehr seltenen SEPs zu erzeugen und zu beschleunigen.

In der Zweiteilung von Kometenschweif wird der Sonnenwind indirekt sichtbar. Während der Staubschweif (weiß) der Flugbahn des Kometen folgt, ist der Ionenschweif (blau) entlang der magnetischen Feldlinien des Sonnenwindes ausgerichtet.

Der schnelle und der langsame Sonnenwind

	langsamer Sonnenwind	schneller Sonnenwind
» Geschwindigkeit in Erdnähe	300-500 Kilometer pro Sekunde	ca. 750 Kilometer pro Sekunde
» Temperatur in Erdnähe	1,4 – 1,6 x 10 ⁵ Kelvin	8 x 10 ⁵ Kelvin
» Zusammensetzung	wie das Sonnenplasma in der Korona	wie das Sonnenplasma an der sichtbaren Oberfläche der Sonne
» Ursprung	magnetisch komplexe Regionen; hauptsächlich in Äquaturnähe; im Aktivitätsmaximum auch von den Polen	aus dem Innern koronaler Löcher; meist in der Nähe der Pole
» Wann im Sonnenzyklus?	immer	vor allem im Aktivitätsminimum der Sonne



Was die Sonne ins All spuckt

Sonnenwind: ständiger Strom aus geladenen Teilchen

Koronaler Massenauswurf (engl.: coronal mass ejection; kurz: CME): extremste Form des Sonnenwindes; Ereignis, bei dem innerhalb kurzer Zeit eine große Menge geladener Teilchen mit Geschwindigkeiten von bis zu 1000 Kilometern pro Sekunde explosionsartig entweichen.

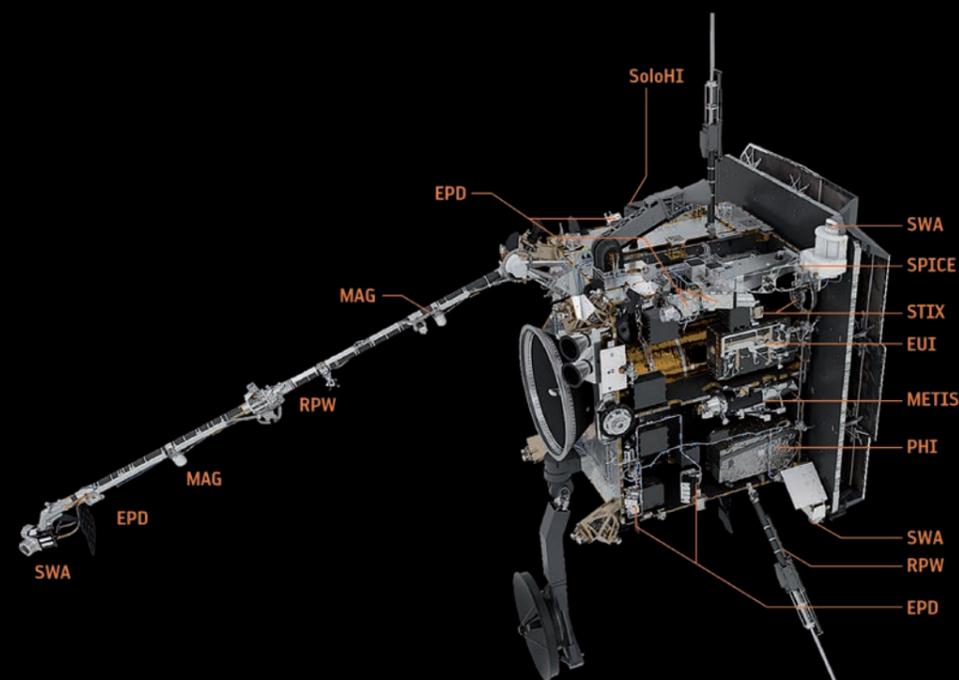
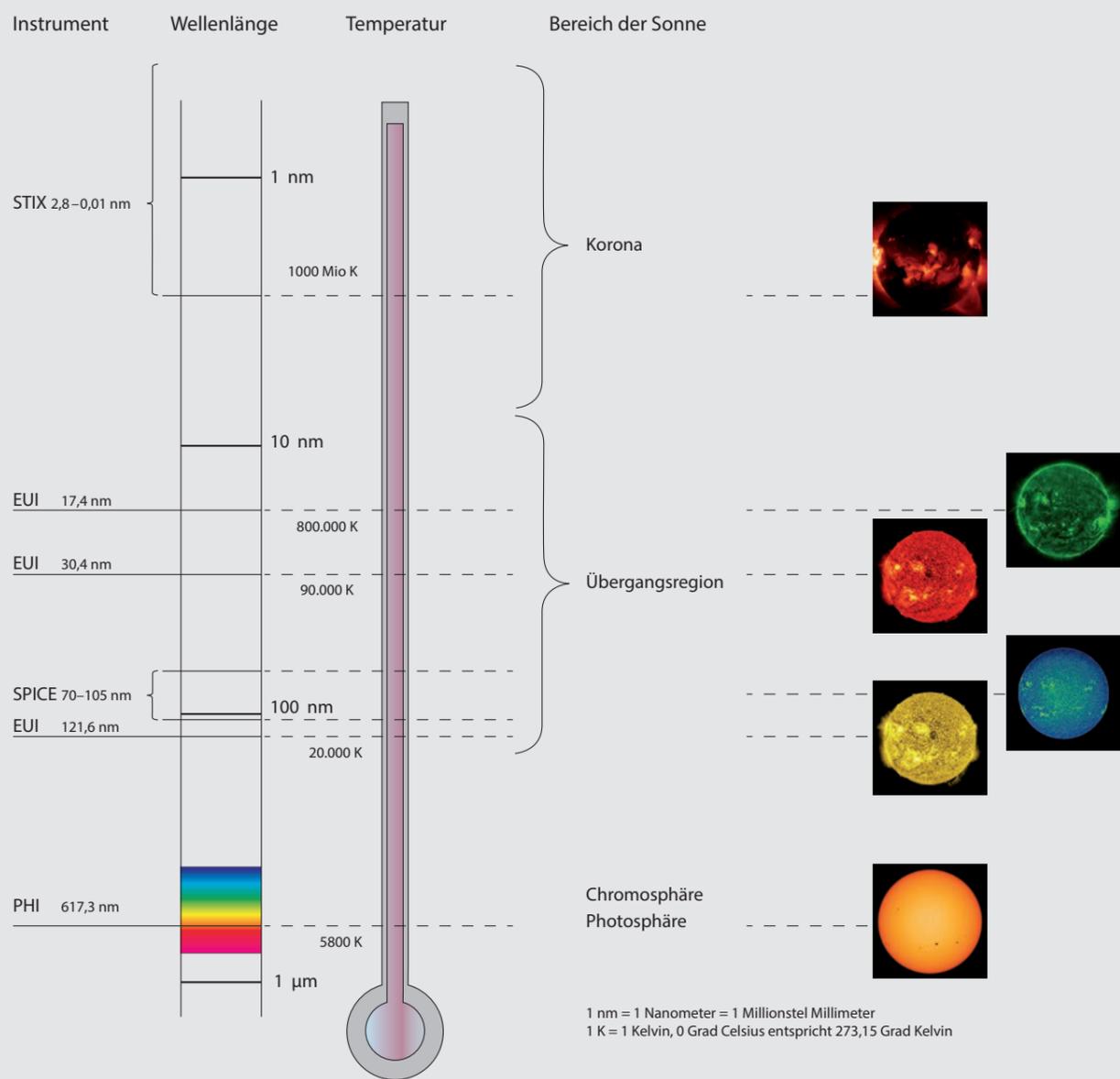
Flare: Plötzlicher, lokaler Anstieg der Strahlungsintensität der Sonne. Flares umfassen Strahlung aller Wellenlängen von Radiowellen bis hin zu Gammastrahlen, allerdings nur wenig sichtbares Licht. Sie werden oft (aber nicht immer) von CMEs begleitet.

SEP (Solar Energetic Particles): Bei einigen Flares werden SEPs emittiert. Dies sind Elektronen, Protonen und Atomkerne mit besonders hohen Energien; sie können nahezu Lichtgeschwindigkeit erreichen.

Der vielfache Blick auf die Sonne

Die Sonne strahlt nicht nur sichtbares Licht ins All, sondern auch elektromagnetische Strahlung vieler anderer Wellenlängen: von langwelligem Radio- über Infrarot, sichtbares Licht, ultraviolettes Licht bis hin zu hochenergetischen Röntgen- und Gammastrahlen. Den einzelnen Komponenten des Sonnenspektrums lassen sich verschiedene Informationen über die Sonne entnehmen. So erlauben sie etwa einen Blick in verschiedene Schichten der Sonne. Die wissenschaftlichen Instrumente von Solar Orbiter sind je nach Fragestellung auf eine oder mehrere Wellenlängen des Sonnenlichts spezialisiert.

Je nachdem, welche Temperatur im Sonnenplasma vorherrscht, strahlt es Licht einer anderen Wellenlänge aus. Das ist ähnlich wie bei Metall, das in einer Esse erhitzt wird. Bei mäßiger Hitze glüht es zunächst rot, um dann bei höheren Temperaturen gelb-weiß zu leuchten. Auf diese Weise lässt sich die Strahlung von der Sonne einer bestimmten Temperatur und damit einer bestimmten Schicht zuordnen. Sehr kurzwellige Strahlung im Bereich der Röntgenstrahlung etwa entsteht in den heißesten Strukturen der heißen Korona; rotes Licht stammt von der vergleichsweise kühlen Oberfläche der Sonne.



Instrument	Aufgabe	Beteiligte Länder	Leitende Forschungseinrichtung
In situ-Instrumente			
EPD (Energetic Particle Detektor)	Vermessen der hochenergetischen Teilchen im Sonnenwind	Spanien, Deutschland, USA, ESA	Universität von Alcalá
MAG (Magnetometer)	Messungen des Magnetfeldes der Heliosphäre	Vereinigtes Königreich	Imperial College London
RPW (Radio and Plasma Waves)	Bestimmen der Eigenschaften elektromagnetischer und elektrostatischer Wellen in der Heliosphäre	Frankreich, Schweden, Tschechien, Österreich	Observatoire de Paris
SWA (Solar Wind Plasma Analyser)	Bestimmen der Eigenschaften der Ionen und Elektronen des Sonnenwindes	Vereinigtes Königreich, Italien, Frankreich, USA	Mullard Space Science Laboratory
Fernerkundungsinstrumente			
EUI (Extreme Ultraviolet Imager)	Aufnahmen der Korona in schneller Abfolge	Belgien, Vereinigtes Königreich, Frankreich, Deutschland, Schweiz	Centre Spatial de Liège
Koronograph Metis	Abbilden des Bereichs zwischen äußerer Atmosphäre und innerer Heliosphäre	Italien, Deutschland, Tschechische Republik	Universität von Florenz
PHI (Polarimetric and Helioseismic Imager)	Messungen des Magnetfeldes und der Plasmageschwindigkeit an der Sonnenoberfläche; helioseismische Messungen	Deutschland, Spanien, Frankreich	Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung
SoloHI (Heliospheric Imager)	Untersuchen des Sonnenlichtes, das die Sonnenwind-Elektronen streuen; Abbilden des Sonnenwindes mit Hilfe des Lichtes, das die Sonnenwindteilchen streuen	USA	US Naval Research Laboratory
SPICE (Spectral Imaging of the Coronal Environment)	Spektroskopische Untersuchungen der Korona	Vereinigtes Königreich, Deutschland, Frankreich, Schweiz, USA	ESA
STIX (X-Ray Spectrometer/ Telescope)	Untersuchen der Röntgenstrahlen von der Sonne	Schweiz, Polen, Deutschland, Tschechische Republik, Frankreich	Fachhochschule Nordwestschweiz

Instrumente mit MPS-Beteiligung

Hardware aus Göttingen

Zu vier der insgesamt zehn Instrumente von Solar Orbiter haben Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler, Ingenieurinnen und Ingenieure des MPS maßgeblich beigetragen. Während beim Doppelteleskop PHI die gesamte Entwicklung und der Bau in MPS-Hand lag, wurden für die Instrumente EUI, Metis und SPICE wichtige Teilinstrumente und Komponenten beigesteuert.



EUI



SPICE



METIS

PHI (Polarimetric and Helioseismic Imager): Doppelteleskop mit Durchblick

Das Instrument PHI genießt mit seinen beiden Teleskopen einen doppelten Blick auf die Sonne: Das Full Disc Telescope überwacht die gesamte Sonnenscheibe; das High Resolution Telescope fokussiert auf einen kleinen Ausschnitt. In diesem lassen sich bei größter Sonnenannäherung Strukturen mit einer Größe von 200 Kilometern darstellen.

Eine der Aufgaben von PHI ist es, auf diese Weise die wechselhaften Magnetfelder an der Sonnenoberfläche sichtbar zu machen sowie ihre Stärke und Richtung zu bestimmen. Doch wie ist das möglich? Wie kann das Instrument Magnetfelder vermessen, die Millionen von Kilometern entfernt sind? Zum Glück stecken alle notwendigen Informationen im Licht, das die Sonne ins All strahlt. Zu diesem Zweck macht sich PHI die Eisenatome in der Sonne zu Verbündeten. Sie reagieren besonders empfindlich auf Magnetfelder und strahlen in Gegenwart eines Magnetfeldes Licht anderer Wellenlängen ins All als sonst. Dies bezeichnet man als Zeemann-Effekt. Speziell das rote Licht, das die Atome emittieren, ist ein guter Indikator. Ohne Magnetfeld hat es eine Wellenlänge von 671,3 Nanometern. Kommt ein Magnetfeld ins Spiel, lassen sich zwei eng um diesen Wert zentrierte rote Wellenlängen messen. Je weiter sie auseinanderliegen, desto stärker ist das Magnetfeld. Das Eintrittsfenster von PHI lässt allein rotes Licht in der Nähe dieser Wellenlänge passieren, um es dann genauer zu untersuchen.

Neben der genauen Wellenlänge geht es dabei um die Polarisation des Lichtes, also die Richtung, in der die Lichtwelle schwingt. Verschiedene Schwingungsrichtungen, sogenannte Polarisations-

zustände, enthalten die Information über verschiedene Richtungsanteile des Magnetfeldes. Schritt für Schritt rastern im Wechsel beide Teleskope einen schmalen Wellenlängenbereich und verschiedene Polarisationszustände ab – und erhalten so ein Magnetogramm der Sonne, eine Art magnetische Landkarte.

Auf ähnliche Weise spürt PHI einer weiteren Eigenschaft der Sonne nach: der Strömungsgeschwindigkeit des Plasmas an der Oberfläche. Wenn sich Atome vom Beobachter fort oder auf ihn zubewegen, verändert sich die Wellenlänge des emittierten Lichtes leicht. Dieser sogenannte Doppler-Effekt sorgt beispielsweise dafür, dass das Martinshorn eines vorbeirasenden Krankenwagens zunächst höher, dann tiefer klingt. Auch die Wellenlänge des roten Lichts der Eisenatome im Sonnenplasma ist deshalb je nach Bewegungsrichtung leicht zu größeren oder kleineren Wellenlängen verschoben. Die Verschiebung ist ein Maß für die Geschwindigkeit, mit der sich das Plasma auf den Beobachter zu oder von ihm fortbewegt.

Mit diesen Informationen gelingt es PHI sogar, indirekt tief in die Sonne hineinzuschauen – bis in den Bereich unter der Oberfläche, in dem die Magnetfelder der Sonne entstehen. Durch die gewaltigen Plasmaumwälzungen, die sich dort vollziehen, entstehen Schwingungen, die sich durchs Sonneninnere bis zur Oberfläche fortsetzen. Ähnlich wie das Beobachten von Erdbebenwellen an der Erdoberfläche Rückschlüsse auf deren Ausbreitung im Innern des Planeten zulässt, erlauben die Messungen der Plasmageschwindigkeiten an der Sonnenoberfläche einen indirekten Blick auf die Schwingungen tief im Innern des Sterns – und damit auf die Vorgänge, die das Magnetfeld erzeugen.

Die drei Instrumente EUI, Metis und SPICE untersuchen die äußere Atmosphäre und die Umgebung der Sonne. Jedes Instrument ist dabei auf eine bestimmte Aufgabe spezialisiert und bietet so einen ganz eigenen Blick auf diese Schlüsselregionen. EUI und SPICE sind auf dieselbe Stelle auf der Sonne gerichtet wie PHI. Auf diese Weise können die beteiligten Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus ein und der derselben Region Daten aus verschiedenen Höhen sammeln und zu einem Gesamtbild der Vorgänge auf der Sonne zusammensetzen. Metis hingegen schaut an der Sonnenscheibe vorbei auf die innerste Heliosphäre.

EUI (Extreme-Ultraviolett Imager): Korona im Sekundentakt

Das Instrument EUI liefert Aufnahmen der Korona im Sekundentakt und kann so schnell veränderlichen Prozesse sichtbar machen. Während eines der drei Spiegelteleskope von EUI die gesamte Sonnenscheibe im Blick behält, bieten die beiden weiteren hochauflösenden Bilder einzelner Regionen. Alle drei bilden die extrem kurzwellige ultraviolette Strahlung der Sonne ab – und können so die besonders heißen Strukturen der Sonnenkorona sichtbar machen.

Während eines der beiden hochauflösenden Teleskope auf diese Weise auf die obere Korona schaut, blickt das andere, das unter Leitung des MPS entwickelt wurde, auf die untere Korona. Auf diese Weise entsteht ein umfassendes Bild der dynamischen Prozesse in dieser Region.

SPICE (Spectral Imaging of the Coronal Environment): Die Wellenlängen der Korona

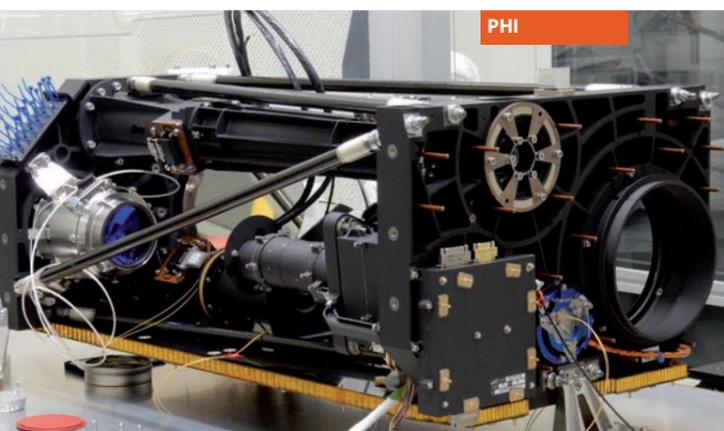
Auch SPICE blickt in die Korona der Sonne. Anders als EUI spaltet das Instrument die ultraviolette Strahlung aus dieser Region in ihre verschiedenen Wellenlängen auf. So lassen sich Informationen über die Temperaturen und Geschwindigkeiten des Sonnenplasmas gewinnen sowie Aussagen zur Häufigkeit bestimmter Elemente treffen.

Das MPS hat den Hauptspiegel von SPICE zur Verfügung gestellt. Es handelt sich um eine komplette Neuentwicklung, die den besonderen thermischen Bedingungen der Mission Rechnung trägt. Der Spiegel lässt einen Großteil der Sonnenstrahlung passieren, ohne sich dadurch stark aufzuheizen.

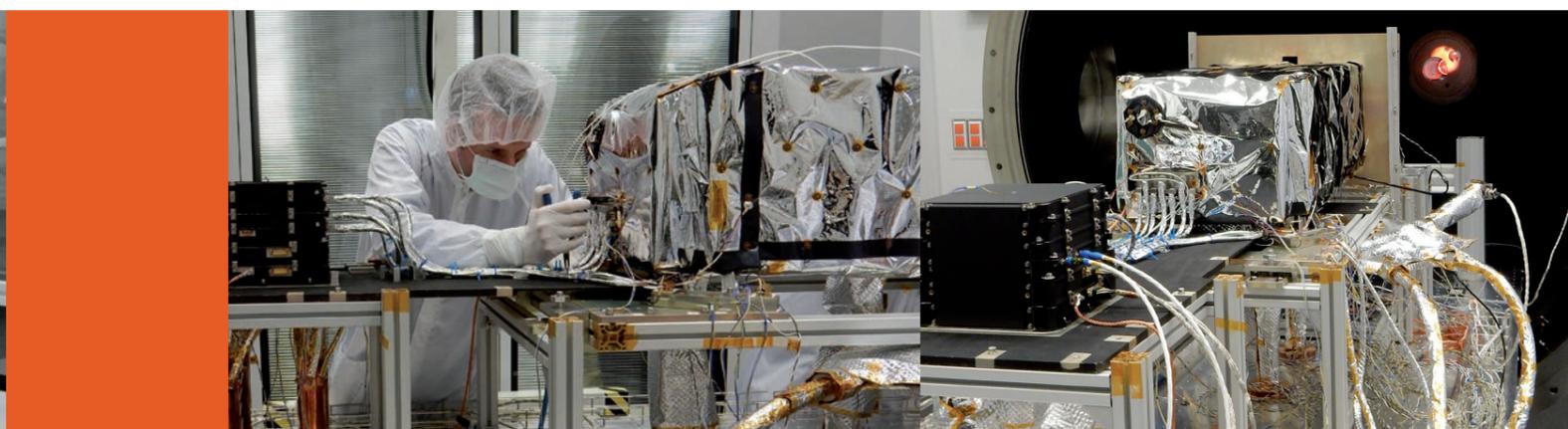
Koronograph Metis: Haarscharf an der Sonne vorbei

Metis liefert Informationen aus der Übergangsregion zwischen der heißen Korona und der innersten Heliosphäre. Zu diesem Zweck blickt das Instrument sozusagen haarscharf an der Sonne vorbei: Der Koronograph deckt den inneren Teil seines Sichtfeldes, die Sonne und ihre Atmosphäre, ab und erzeugt so eine Art künstliche, erweiterte Sonnenfinsternis. Die lichtschwächeren Strukturen der inneren Heliosphäre werden so sichtbar. So können Forscherinnen und Forscher untersuchen, wie sich die Sonnenwindteilchen auf dem ersten Teil ihrer langen Reise durchs Weltall verhalten.

Am MPS wurden die Kameras des Instrumentes entwickelt und gebaut.



PHI



Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung

Das Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung in Göttingen ist eines von 84 Instituten der Max-Planck-Gesellschaft, Deutschlands führender Forschungsorganisation für Grundlagenforschung. Die wissenschaftliche Arbeit am MPS konzentriert sich auf alle Körper in unserem Sonnensystem - also auf die Sonne, die Planeten, Kometen und Asteroiden - sowie auf entfernte Sterne und Exoplaneten. Das Institut ist neben der Mission Solar Orbiter an zahlreichen aktuellen und künftigen Weltraummissionen beteiligt. Zu ihnen zählen InSight, BepiColombo, Exo, Mars, JUICE und PLATO.

Kontakt:

Prof. Dr. Sami K. Solanki
MPS-Direktor, Principal Investigator PHI, Science Team EUI, Metis und SPICE
Email: Solanki@mps.mpg.de
Tel.: +49 551 384 979-325

Dr. Achim Gandorfer
Instrument Scientist PHI
Email: Gandorfer@mps.mpg.de
Tel.: +49 551 384 979-397

Dr. Johann Hirzberger
Operations Scientist PHI
Email: Hirzberger@mps.mpg.de
Tel.: +49 551 384 979-409

Prof. Dr. Hardi Peter
Co-Principal Investigator SPICE, Science Team Metis
Email: Peter@mps.mpg.de
Tel.: +49 551 384 979-413

Dr. Udo Schühle
Co-Principal Investigator EUI, Science Team Metis, PHI und SPICE
Email: Schuehle@mps.mpg.de
Tel.: +49 551 384 979-458

Mission Solar Orbiter

Solar Orbiter ist eine ESA-Mission mit starker Beteiligung der NASA. Hauptauftragnehmer ist Airbus Defence and Space in Stevenage, Großbritannien. Ziel der Mission ist es, beispiellose Nahbeobachtungen der Sonne unter anderem aus hohen Breitengraden durchzuführen, erste Bilder der unerforschten Polargebiete der Sonne zu liefern und die Verbindung zwischen Sonne und Erde zu untersuchen.



Dr. Luca Teriaca
Co-Principal Investigator Metis, Science Team EUI und SPICE
Email: Teriaca@mps.mpg.de
Tel.: +49 551 384 979-453

Dr. Joachim Woch
PHI-Projektmanager, Science Team Metis
Email: Woch@mps.mpg.de
Tel.: +49 551 384 979-447

Dr. Birgit Krummheuer
Presse- und Öffentlichkeitsarbeit
Email: Krummheuer@mps.mpg.de
Tel.: +49 551 384 979-462

www.mps.mpg.de

Layout: www.hormesdesign.de

Bildnachweise:
Titel: ESA/ATG medialab
Seiten 2/3: ESA/ATG medialab; MPS (R. Hormes)
Seiten 4/5: ESA; MPS; ESA; MPS; MPS
Seiten 6/7: NASA/SDO; SST; SILSO graphics (<http://sidc.be/silso/>)
Royal Observatory of Belgium; NASA/ESA/SOHO; NASA/SDO
Seiten 8/9: NASA/MSFC/MPS; ESA; MPS
Seiten 10/11: N. LefandeuX/ S. Koutchmy/NASA/ESA/SOHO/SDO;
NASA/ESA/SOHO; NASA/SDO
Seiten 12/13: ISAS/Yokoh; NASA/SDO; NASA/SDO; NASA/SDO;
NASA/SDO; NASA/SDO; ESA/ATG medialab/MPS
Seiten 14/15: CSL; STFC RAL Space; Metis-Team; MPS
Rücken: MPS

