

# Gluthölle hautnah

Die ESA-Sonde Solar Orbiter  
ist im Anflug auf die Sonne



## IN KÜRZE

- Mit dem erfolgreichen Start der Raumsonde Solar Orbiter im Februar 2020 begann ein neues Kapitel der Sonnenforschung.
- Die Sonde erkundet erstmals mit einer Reihe von Spezialinstrumenten unser Tagesgestirn an den Polen.
- Solar Orbiter ist eine gemeinsame Mission der Europäischen Weltraumagentur ESA und der US-Raumfahrtbehörde NASA.



*Am 10. Februar 2020 startete die ESA-Raumsonde Solar Orbiter erfolgreich ins All. Noch niemals zuvor wurde unsere Sonne derart umfassend von einer ganzen Armada leistungsstarker Instrumente untersucht. Die Mission ist eine Herausforderung, weil unserem Heimatstern die letzten Geheimnisse entlockt werden sollen: Wie entstehen die Magnetfelder tief im Inneren des Glutballs, und wie bildet sich der Sonnenwind?*

Die Sonde Solar Orbiter erkundet die Sonne mit zehn unterschiedlichen wissenschaftlichen Instrumenten und nähert sich dabei unserem Tagesgestirn auf bis zu 42 Millionen Kilometer an.

ESA / ATG medialab

**M**it dem Start von Solar Orbiter an Bord einer Atlas-V-Trägerrakete am 10. Februar 2020 schlägt die Europäische Raumfahrtagentur ESA in intensiver Zusammenarbeit mit ihrem US-amerikanischen Pendant NASA ein neues Kapitel in der Erforschung unseres Heimatgestirns auf. Der Start gelang perfekt, und die Sonde befindet sich auf ihrer vorgesehenen Flugbahn. Diese wird sie in den nächsten Jahren mehrmals dicht an die Venus und unsere Erde heranführen, um ihren Orbit den vorgesehenen Messungen anzupassen. Das Ausfahren der Sensorenausleger für die wissenschaftlichen Instrumente und der Richtantenne für die Kommunikation mit der Erde verliefen ohne Probleme, und die wissenschaftliche Nutzlast zeigt sich in optimaler Verfassung. Über die nächsten Monate hinweg wird Solar Orbiter in Betrieb genommen, und seine Instrumente werden optimiert, um sich danach voll und ganz unserer Sonne und ihrer weiteren Umgebung, der Heliosphäre, widmen zu können.

### Der Ursprung des Sonnenwinds

Die ausgedehnte Atmosphäre der Sonne, die Heliosphäre, erstreckt sich bis weit hinter die Umlaufbahn des äußersten Planeten Neptun und ist unsere kosmische Heimat. Die Struktur der Heliosphäre beeinflusst wesentlich die Atmosphäre der Erde – und auf diese Weise letztlich auch

das Leben auf unserem Planeten. Die Astrophysiker möchten die Zusammenhänge zwischen Sonne und Heliosphäre erforschen, die uns ein grundlegendes Verständnis unseres gesamten Sonnensystems liefern sollen.

Unser aktuelles Wissen beruht vor allem auf den Ergebnissen vergangener und aktueller Weltraummissionen, die unser Tagesgestirn seit dem Jahr 1974 im Blick hatten: Helios, Voyager, Ulysses, Yohkoh, SOHO, TRACE, RHESSI, Hinode, STEREO und SDO (siehe Kasten S. 37). Jede dieser Missionen hatte einen spezifischen Schwerpunkt und war Teil einer Gesamtstrategie zur Sonnenforschung. Keine war jedoch in der Lage, die Grenzflächenregion in der äußeren Hülle der Sonne, also zwischen der Chromosphäre und der Korona, in welcher der Sonnenwind geboren wird, vollständig zu charakterisieren. Dieses ist eines der wichtigsten Ziele von Solar Orbiter.

Mit einer Kombination aus In-situ- und Fernerkundungsinstrumenten und dem Design der Flugbahn innerhalb der Heliosphäre möchten die Sonnenforscher zentrale Fragen der Heliophysik beantworten: Wie gelingt es unserem Zentralgestirn, den Sonnenwind, den nie abreißen Teilchenstrom aus elektrisch geladenen Partikeln, auf geradezu unvorstellbare Geschwindigkeiten von bis zu 800 Kilometern pro Sekunde (oder 2,9 Millionen Kilometern pro Stunde) zu beschleunigen?

Warum zeigt sich unser Stern einem etwa elfjährigen Rhythmus folgend mal mehr, mal weniger aktiv? Warum kommt es zu heftigen Sonneneruptionen? Und welche Rolle spielen bei all diesen Phänomenen die Magnetfelder der Sonne?

### Eine neue Perspektive: Der Blick von oben

Doch was genau unterscheidet Solar Orbiter von den früheren Missionen? Warum hat gerade diese Sonde das Potenzial, diese offenen Fragen der Sonnenphysik zu beantworten?

In gewisser Weise ist das eine Frage der Perspektive. Von der Erde aus bietet sich nur ein eingeschränkter Blick auf die Sonne. Unser Planet kreist – ähnlich wie die sieben anderen – annähernd innerhalb einer Ebene um die Sonne, die um nur sieben Grad gegen den Sonnenäquator geneigt ist. Daher bleibt erdgebundenen Teleskopen lediglich der weitgehend unverzerrte Blick auf die äquatorialen Gebiete der Sonne – also auf solche in niedrigen heliografischen Breiten. Den meisten Raumsonden, welche die Sonne erkunden, ergeht es kaum besser: Sie bleiben in Erdnähe oder zumindest innerhalb der Erdbahnebene.

Die Polregionen unseres Heimatgestirns sind aus diesem Grund kaum erforscht. Viele Eigenschaften der Sonne, die in Regionen auf niedriger heliografischer Breite bereits gut untersucht wurden, sind dort noch unbekannt. Das trifft nicht nur auf die Magnetfelder der Sonne zu, sondern beispielsweise auch auf die Rotationsgeschwindigkeit, mit der sich die Sonne um ihre Achse dreht. Sie ist besonders, weil sie stark von der heliografischen Breite abhängt; es handelt sich demnach um eine differenzielle Rotation. Zudem haben die besonders schnellen Teilchen des Sonnenwinds ihren Ursprung an den Polen. Um ihren Beschleunigungsmechanismus zu erforschen, ist ein genauer Blick auf diese Regionen unerlässlich.

Hier setzt nun Solar Orbiter an. Zum einen wagt sich die Raumsonde nah an unseren Stern heran: Nur etwa 42 Millionen Kilometer werden die Sonde im sonnennächsten Punkt von ihrem Forschungsobjekt trennen. Das ist nur wenig mehr als ein Viertel des Abstands Erde–Sonne, der auch als Astronomische Einheit (AE) bezeichnet wird und ungefähr 150 Millionen Kilometer beträgt. Zum



ESA / ATG media lab

**Sieben Mal wird Solar Orbiter während seiner Mission die Venus in geringem Abstand passieren, um durch ihr Schwerefeld die Neigung zur Erdbahnebene zu erhöhen. Nur so lassen sich die Sonnenpole direkt beobachten.**

# Der Solar Orbiter im Vergleich mit anderen Sonnenmissionen

■ **Sonnennähe:** Nur wenige Weltraummissionen haben sich bisher in den Raum innerhalb der Umlaufbahn von Merkur vorgewagt. Die ersten, denen dieses Kunststück gelang, waren Mitte der 1970er Jahre die Sonden Helios-A und Helios-B, ein gemeinsames Projekt der westdeutschen und der amerikanischen Weltraumorganisationen DFVLR und NASA. Auch das MPS in Göttingen war damals maßgeblich beteiligt.

Die Helios-Sonden untersuchten zwar ähnliche Fragestellungen wie Solar Orbiter, waren jedoch mit deutlich weniger und viel einfacheren Messinstrumenten ausgerüstet. Da sie sich zur Lageregulierung um die eigene Achse drehten, konnten sie keine Aufnahmen der Sonne machen, weil die Bilder durch die Rotation der Sonde »verschmiert« worden wären.

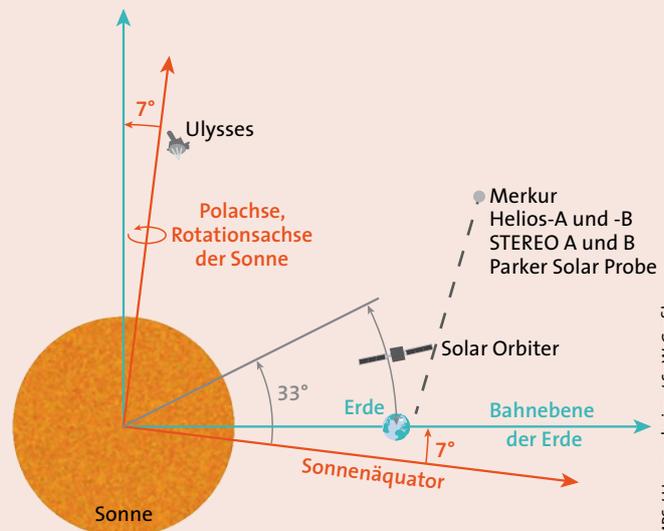
Den Rekord für den geringsten Abstand zur Sonne hält schon jetzt die NASA-Mission Parker Solar Probe. Die Mission startete im Jahr 2018 ins All; 2024 soll sie sich der Sonne sogar bis auf nur rund sechs Millionen Kilometer annähern.

■ **Blick auf die Pole:** Ein weiterer Wegbereiter für Solar Orbiter war die Raumsonde Ulysses, zu der das MPS wesentlich beitrug. Als erstes Raumfahrzeug überhaupt verließ sie die Bahnebene der Erde. Im Zeitraum von 1994 bis 2009 flog Ulysses insgesamt drei Mal über die Polregionen der Sonne. Allerdings blieb die Sonde dabei rund 4 AE entfernt, also weit außerhalb der Umlaufbahn der Erde – und verfügte ebenfalls über keine abbildenden Instrumente.

■ **Stereoblick auf die Sonne:** Mit Solar Orbiter wird ein Rundumblick auf die Sonne möglich. Dafür arbeiten die Forscher von Solar Orbiter mit erdgebundenen Sonnenteleskopen oder den Daten von Sonden in Erdnähe zusammen. Während diese auf

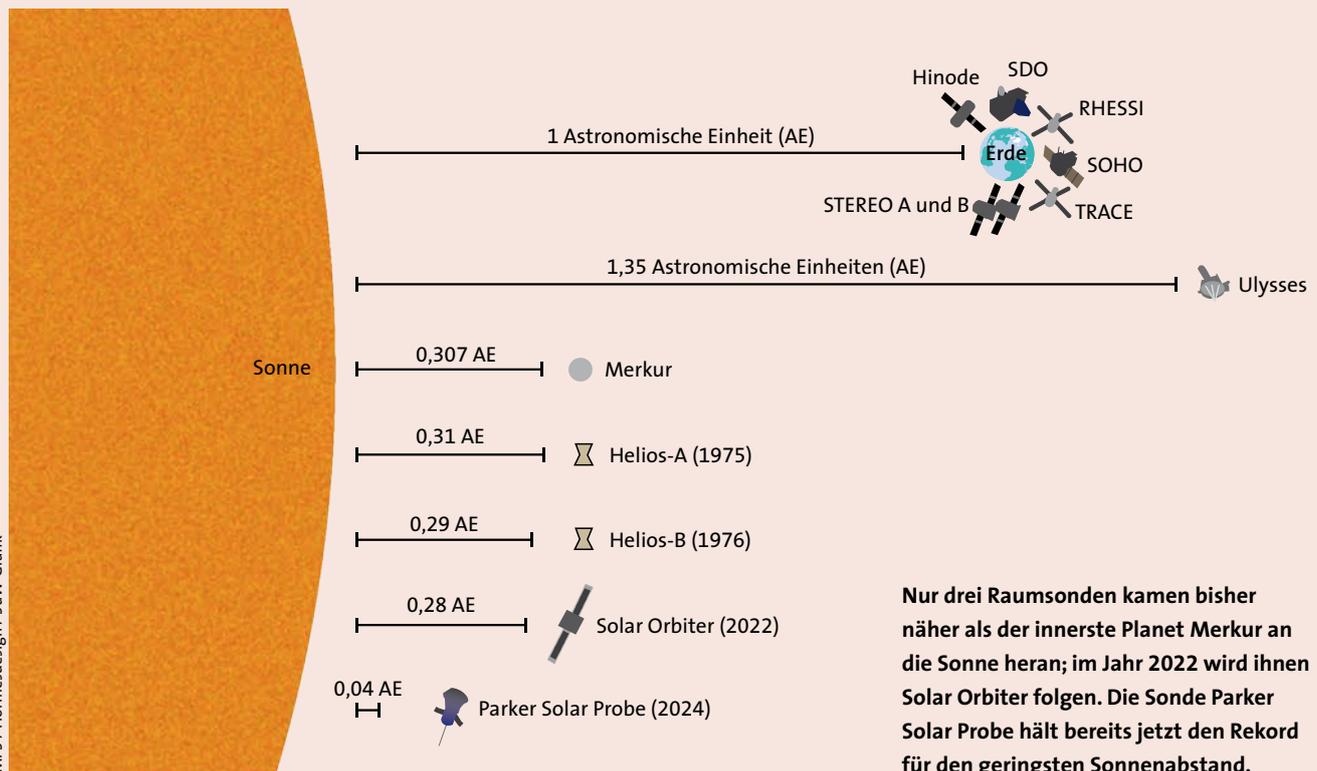
die Sonnenseite schauen, welche der Erde gerade zugewandt ist, blickt Solar Orbiter im Vorbeiflug auf die Rückseite. Beide Perspektiven lassen sich zu einem vollständigen Bild der Sonnenoberfläche und ihrer Umgebung zusammensetzen.

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 eine dreidimensionale Abbildung der Sonnenkorona. Da beide Sonden jedoch nur wenige Instrumente an Bord hatten, blieb der Blick auf die Quellregionen der Sonnenaktivität verwehrt. Das MPS war an zwei Instrumenten beteiligt.



Gegen Ende der Mission wird Solar Orbiter eine Bahnneigung von 33 Grad gegen den Sonnenäquator erreichen.

MPS / Hormesdesign / SuW-Grafik



Nur drei Raumsonden kamen bisher näher als der innerste Planet Merkur an die Sonne heran; im Jahr 2022 wird ihnen Solar Orbiter folgen. Die Sonde Parker Solar Probe hält bereits jetzt den Rekord für den geringsten Sonnenabstand.

MPS / Hormesdesign / SuW-Grafik

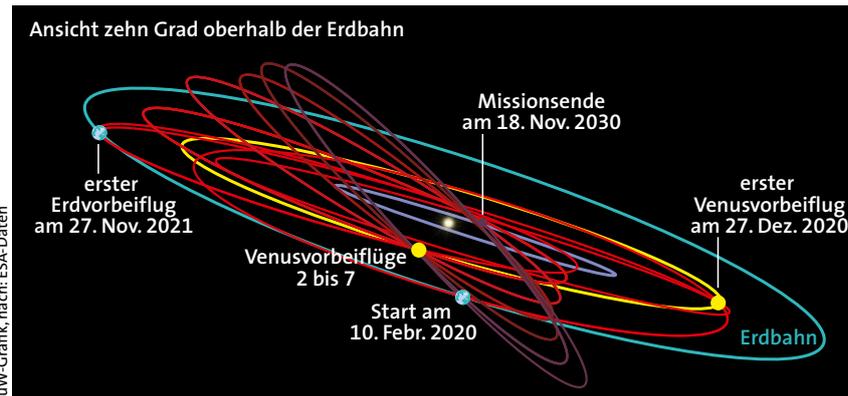
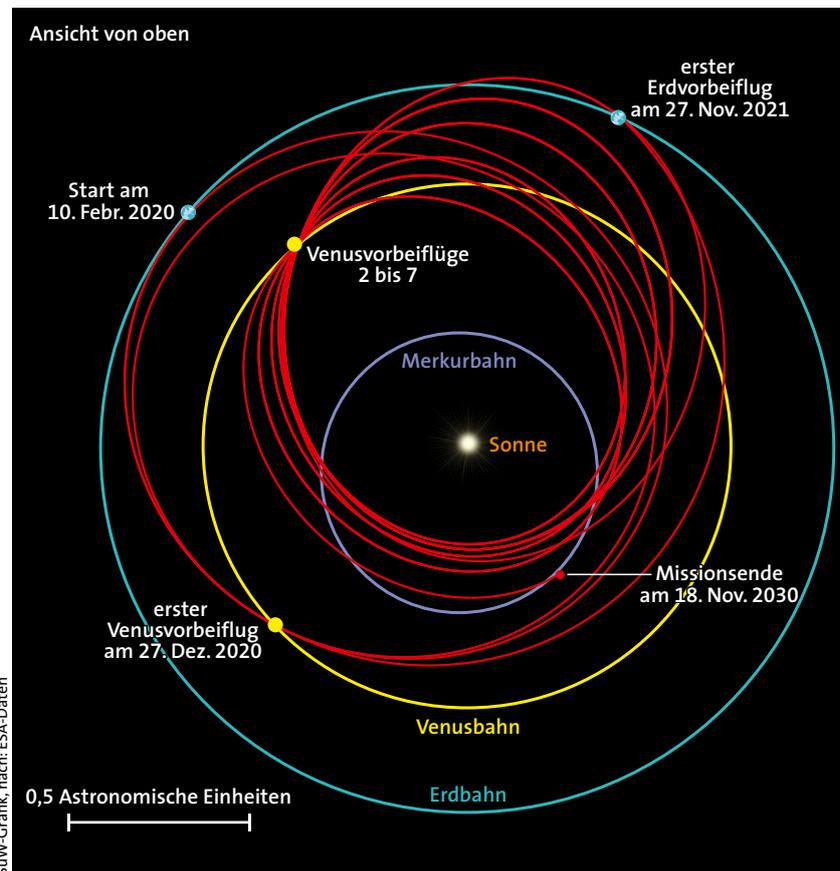
anderen, und mindestens ebenso wichtig: Solar Orbiter wird nach und nach die Bahnebene der Erde verlassen (siehe Grafiken rechts). Die Sonde nutzt den Schwung aus Vorbeiflügen an Erde und Venus, um Schritt für Schritt auf elliptische Umlaufbahnen zwischen 1 AE im sonnenfernsten und 0,28 AE im sonnennächsten Punkt einzuschwenken. Während der sonnennahen Phasen fliegt Solar Orbiter nahezu synchron mit der Sonnendrehung. Dadurch kann die Sonde ein und dieselbe Stelle auf der Sonnenoberfläche, in ihrer Atmosphäre oder ihrer Umgebung, viel länger beobachten als von einem erdnahen Aussichtspunkt.

Weitere Vorbeiflüge an der Venus werden mit der Zeit die Neigung der Flugbahn zum Sonnenäquator erhöhen. Am Ende der Primärmission im Jahr 2027 – etwa sieben Jahre nach dem Start – erreicht die Sonde so bis zu 25 Grad heliografischer Breite, und in der erhofften erweiterten Missionsphase im Jahr 2031 wird sie bis zu 33 Grad heliografischer Breite erreichen. Aus dieser Perspektive lassen sich die Polregionen der Sonne erstmals besser erforschen.

## Zehn Augen sind auf die Sonne gerichtet

Die einzigartige Flugbahn ist nicht die einzige Stärke der Mission: Die wissenschaftliche Nutzlast von Solar Orbiter umfasst zehn leistungsfähige Instrumente (siehe Kasten S. 40). Vier davon untersuchen direkt die Verhältnisse vor Ort, zum Beispiel, den auf die Sonde einprasselnden Sonnenwind oder die Magnetfelder; sie heißen daher In-situ-Instrumente und bestehen aus elf Sensoren, die strategisch sinnvoll außen herum auf der Sonde verteilt sind. Sie sammeln Messdaten in der direkten Umgebung.

Die übrigen Instrumente, sechs an der Zahl, dienen der Fernerkundung. Sie bestehen aus mehreren Teleskopen mit insgesamt zehn Kameras für unterschiedliche Spektralbereiche und werfen einen tiefen Blick auf die verschiedenen Schichten der Sonne: von den gewaltigen Plasmaströmen tief im Inneren über die wechselhaften Magnetfelder an der Oberfläche bis hin zu Vorgängen und Prozessen in der sehr dynamischen Atmosphäre der Sonne. Mit allen Instrumenten werden gemeinsam geplante Beobachtungen durchgeführt werden. Die Kombination von In-situ- und Fernerkundungsinstru-



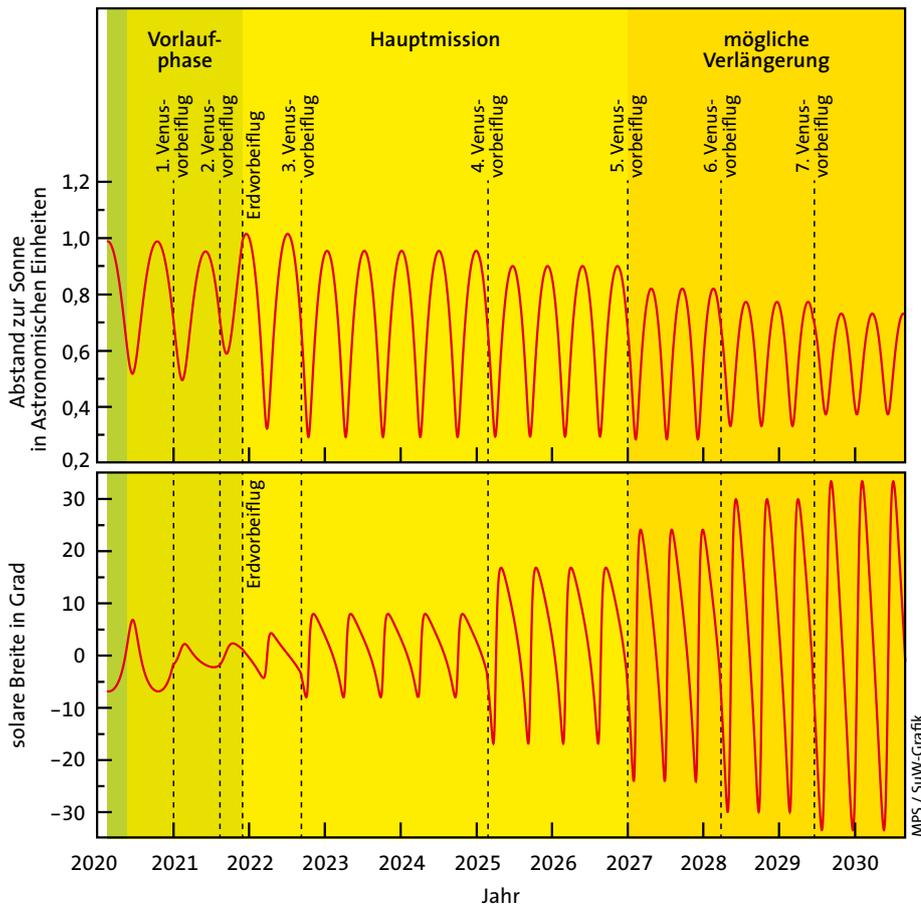
menten auf demselben Raumfahrzeug sowie die neue Perspektive auf die innere Heliosphäre unterscheiden den Solar Orbiter von allen vorherigen und aktuellen Missionen. Sie ermöglicht wissenschaftliche Untersuchungen, die sich auf keine andere Weise erreichen lassen. So ergibt sich für die Wissenschaftler ein komplexes Bild aus sämtlichen Phänomenen und Messungen, die sie zueinander in Beziehung setzen.

Die europäischen nationalen Raumfahrtorganisationen wie zum Beispiel das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), und dessen französisches Gegenstück, die CNES, fördern die Entwicklung der Instrumente und finanzieren deren Herstellung, welche durch die Kooperation multinationaler Konsortien gewährleistet wird (siehe Kasten S. 40). So

tragen Forschungsinstitute mehrerer Nationen zur Herstellung eines Instruments bei: Während eine Institution eines Landes die Leitung des Projekts übernimmt, besteht jedes Instrument aus Beiträgen vieler Partner aus verschiedenen Nationen.

In Deutschland sind vier Forschungseinrichtungen an der Mission beteiligt. Die Abteilung Raumfahrtmanagement des DLR förderte die Entwicklung und den Bau der wissenschaftlichen Instrumente mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie. Das Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung (MPS) in Göttingen ist entscheidend an der wissenschaftlichen Konzeption der Mission beteiligt gewesen und trägt deshalb auch zu vier Instrumenten wesentlich bei. Ebenso mit dabei sind das Institut für Experimentelle und

**Solar Orbiter bewegt sich auf Ellipsenbahnen um unser Zentralgestirn und nutzt Vorbeiflüge an der Venus, um ihre Bahnneigung zu erhöhen und dicht an die Sonne heranzukommen.**



**Der Missionsverlauf von Solar Orbiter ab Februar 2020 enthält mehrere Swingby-Manöver an Venus und Erde, welche die exzentrische Bahn verstärken. So wird ab 2022 die angestrebte Sonnennähe in Höhe von rund 0,3 AE erreicht (oben). Zudem wird die Umlaufbahn zunehmend aus der Planetenebene des Sonnensystems auf bis zu 33 Grad relativ zum Äquator der Sonne herausgehoben (unten).**

Angewandte Physik der Universität Kiel, das Kiepenheuer-Institut für Sonnenphysik in Freiburg und das Leibniz-Institut für Astrophysik Potsdam.

### Die Vorgeschichte

Der Start von Solar Orbiter war nur ein Meilenstein in einer langen Entwicklung. Nach einer fast zehnjährigen Design- und Entwicklungsphase wurde die Raumsonde bis Ende 2018 bei Airbus Defense & Space in Stevenage in Großbritannien fertig gestellt. Danach wurde sie nach Deutschland zur IABG, der Industrieanlagen-Betriebsgesellschaft in Ottobrunn bei München, transportiert, wo sie die Qualifikationstests durchlief, um sicherzustellen, dass sie einsatzbereit ist (siehe Bild rechts). Dabei wurde insbesondere die strukturelle Integrität geprüft, und die thermi-

schen sowie mechanischen Eigenschaften durch Vibrations-, Strahlungs- und Thermal-Vakuum-Tests standen auf dem Plan. Dazu kamen Messungen der elektromagnetischen Verträglichkeit der Instrumente und Aggregate untereinander wie auch die magnetischen Eigenschaften der Sonde, die eventuell einen Einfluss auf die Magnetfeldmessungen vor Ort haben könnten. Darüber hinaus überprüften die Techniker in der Testphase bei der IABG die elektrischen Funktionen der wissenschaftlichen Instrumente sowie die Übertragung der Daten. Im November 2019 wurde die Sonde zum Startplatz in Cape Canaveral nach Florida transportiert, wo bereits die Startvorbereitungen liefen. Bis der vollständige Messbetrieb beginnen kann, vergehen nun nach dem Start allerdings noch etwa eineinhalb Jahre.

Die vier In-situ-Instrumente nahmen ihren Dienst schon früher auf. Wenige Monate nach dem Start im Februar erhielten die Wissenschaftler erste Messdaten. Diese Instrumente spürten dem Sonnenwind nach, dem stetigen Strom aus Elektronen, Protonen, Helium- und weiteren Atomkernen von der Sonne. Mit geradezu unvorstellbar hohen Geschwindigkeiten jagen diese Teilchen durchs All, breiten sich bis weit hinter die Umlaufbahn des äußersten Planeten Neptun aus und erzeugen so die Heliosphäre, eine Blase aus dünnem Plasma, die unser Sonnensystem vom interstellaren Medium trennt.

### Langsamer und schneller Sonnenwind

Die Experten unterscheiden zwei Formen des Sonnenwinds: Der langsame Sonnenwind hat seinen Ursprung hauptsächlich in Äquatornähe, im Aktivitätsmaximum aber auch an den Polen der Sonne und erreicht Geschwindigkeiten von 300 bis 500 Kilometern pro Sekunde. Der schnelle Sonnenwind breitet sich dagegen mit Geschwindigkeiten von bis zu 800 Kilometern pro Sekunde aus. Er tritt vor allem im Aktivitätsminimum unseres Heimatsterns auf und beginnt seine Reise in erster Linie an den solaren Polen.

Die geladenen Teilchen strömen dort aus koronalen Löchern heraus, die im Bereich der Röntgenstrahlung dunkel er-



**Die Raumsonde Solar Orbiter wurde hier während der Testphase bei der Industrieanlagen-Betriebsgesellschaft (IABG) in Ottobrunn bei München aufgenommen. Die Sonde hat eine Länge von etwa 2,5 Metern.**

scheinen und sich in der äußeren Sonnenatmosphäre befinden. In diesen Regionen reichen die Feldlinien des Sonnenmagnetfelds weit in den Weltraum hinaus und erlauben es den Teilchen, zu entweichen. Wegen der geringeren Plasmadichte sehen diese Regionen in der Röntgen- oder Ultraviolettstrahlung deshalb dunkler aus als ihre Umgebung.

In Äquatornähe beschreiben die Feldlinien kleinere Bögen. Das Sonnenplasma ist dort stärker an das Magnetfeld gebunden; die Sonnenwindteilchen verlassen die Sonne deshalb dort mit geringeren

Geschwindigkeiten. Die enorme Stärke des Magnetfelds führt immer wieder zu explosionsartigen Ausbrüchen, die Partikel mit sehr hohen Energien in die Heliosphäre hinausschleudern.

Um diese Vorgänge besser zu verstehen, bestimmen die vier In-situ-Instrumente von Solar Orbiter verschiedene Eigenschaften des Sonnenwinds. Mehrere Teilchendetektoren des EPD, des »Energetic Particle Detector« (siehe Kasten unten), werden die Zusammensetzung, das Timing und die Energie der hochenergetischen Sonnenwindteilchen analysieren. Das Instrument

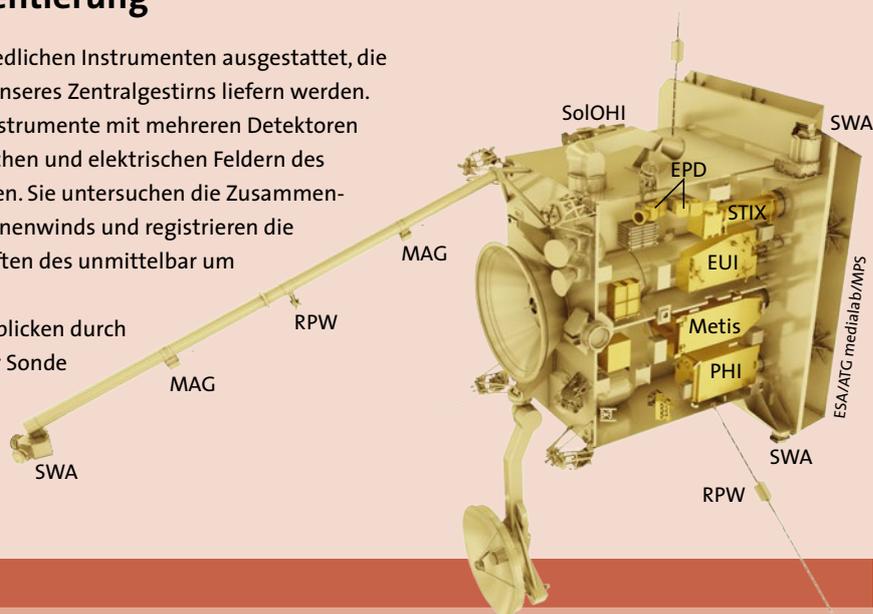
SWA, der »Solar Wind Plasma Analyser«, besteht aus einer Reihe von Sensoren, die beispielsweise die Dichte, die Geschwindigkeit und die Temperatur des Sonnenwinds registrieren. Das Instrument kann zudem schwerere Elemente nachweisen, die vom Sonnenwind mitgetragen werden. Um diesen zu charakterisieren, müssen ihre Häufigkeiten im Sonnenwind bekannt sein und mit der Elementhäufigkeit auf der Sonne in Beziehung gesetzt werden.

Auf die elektromagnetischen Felder, die der Sonnenwind mitführt, blicken das Magnetometer MAG und das Instrument

## Eine reichhaltige Instrumentierung

Der Solar Orbiter ist mit zehn unterschiedlichen Instrumenten ausgestattet, die zusammen ein sehr detailliertes Bild unseres Zentralgestirns liefern werden. An dem langen Ausleger sind die In-situ-Instrumente mit mehreren Detektoren montiert, die ungestört von den magnetischen und elektrischen Feldern des Sondenkörpers ihren Messungen nachgehen. Sie untersuchen die Zusammensetzung des die Sonde umströmenden Sonnenwinds und registrieren die elektrischen und magnetischen Eigenschaften des unmittelbar um die Sonde befindlichen Weltraums.

Die sechs Fernerkundungsinstrumente blicken durch Öffnungen im rechteckigen Hitzeschild der Sonde direkt auf die Oberfläche der Sonne und nehmen sie in unterschiedlichen Spektralbereichen vom sichtbaren bis hin zum Röntgenlicht auf.



### Instrumente von Solar Orbiter

Instrument	Aufgabe	Beteiligte Länder
<b>In-situ-Instrumente</b>		
EPD (Energetic Particle Detector)	Vermessen der hochenergetischen Teilchen im Sonnenwind	Spanien, Deutschland, USA, ESA
MAG (Magnetometer)	Messungen des Magnetfelds der Heliosphäre	Großbritannien
RPW (Radio and Plasma Waves)	Bestimmen der Eigenschaften elektromagnetischer und elektrostatischer Wellen in der Heliosphäre	Frankreich, Schweden, Tschechien, Österreich
SWA (Solar Wind Plasma Analyser)	Bestimmen der Eigenschaften der Ionen und Elektronen des Sonnenwinds	Großbritannien, Italien, Frankreich, USA
<b>Fernerkundungsinstrumente</b>		
EUI (Extreme Ultraviolet Imager)	Aufnahmen der Korona in schneller Abfolge	Belgien, Großbritannien, Frankreich, Deutschland, Schweiz
Koronograph Metis	Abilden des Bereichs zwischen äußerer Atmosphäre und innerer Heliosphäre	Italien, Deutschland, Tschechische Republik
PHI (Polarimetric and Helioseismic Imager)	Messungen des Magnetfelds und der Plasmageschwindigkeit an der Sonnenoberfläche; helioseismische Messungen	Deutschland, Spanien, Frankreich
SoloHI (Heliospheric Imager)	Untersuchen des Sonnenlichts, das die Sonnenwindelektronen streuen Abilden des Sonnenwinds mit Hilfe des Lichts, das die Sonnenwindteilchen streuen	USA
SPICE (Spectral Imaging of the Coronal Environment)	Spektroskopie der Korona Bestimmung von Plasmageschwindigkeiten, -dichten, Temperaturen und Elementhäufigkeiten	Großbritannien, Deutschland, Frankreich, Schweiz, USA
STIX (X-Ray Spectrometer/Telescope)	Spektroskopische Abbildung der Röntgenstrahlen von der Sonne	Schweiz, Polen, Deutschland, Tschechische Republik, Frankreich

RPW, »Radio and Plasma Waves«. MAG misst die heliosphärische Magnetfeldstärke am jeweiligen Ort der Sonde mit hoher Präzision. Dies erlaubt den Sonnenforschern detaillierte Aussagen darüber zu treffen, wie sich das Magnetfeld der Sonne in den Weltraum einfügt und im Verlauf eines Sonnenzyklus entwickelt. Mit Radioantennen spürt das RPW magnetischen und elektrischen Wellen im Sonnenwind nach.

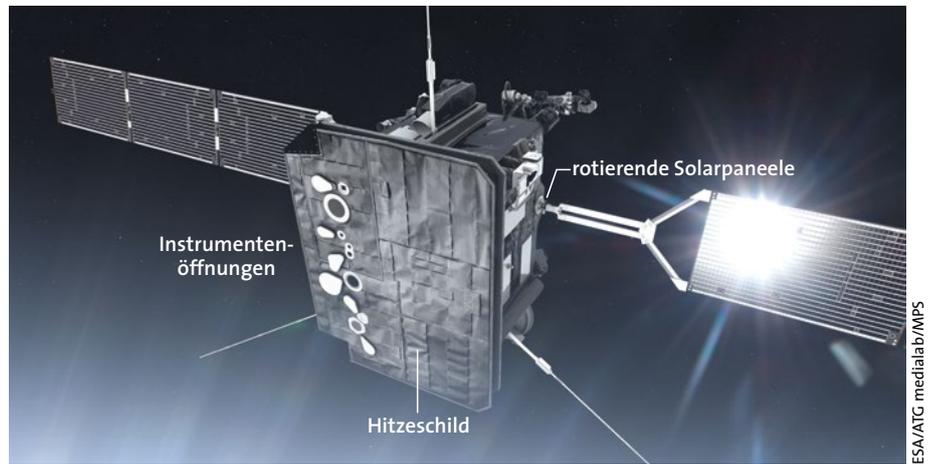
Um möglichst viel über die Mechanismen zu erfahren, die den Sonnenwind beschleunigen, ist es wichtig, die Sonnenwindteilchen möglichst nahe an ihrem Entstehungsort zu untersuchen. Auf ihrem weiteren Weg durch das All stehen die Sonnenwindteilchen miteinander in Wechselwirkung und spüren sich auf Grund der mitgeführten Magnetfelder. Ihre ursprünglichen Eigenschaften lassen sich dann nur noch schwer rekonstruieren.

Noch näher als Solar Orbiter fliegt die NASA-Sonde Parker Solar Probe an die Sonne heran (siehe SuW 9/2018, S. 34). Im Jahr 2018 startete die Mission ins All mit dem Versprechen, die Sonne – oder zumindest ihre äußerste Hülle – »zu berühren« und dort den Sonnenwind zu untersuchen. Nach rund zwei Jahren im All hält die Sonde schon jetzt den Rekord für den geringsten Abstand zur Sonne. In vier Jahren soll sie sich unserem Stern sogar bis auf knapp sechs Millionen Kilometer nähern.

Beide Raumsonden arbeiten zusammen und ergänzen sich: Parker Solar Probe fliegt näher an die Sonne heran und misst somit ursprünglichen Sonnenwind; Solar Orbiter trägt mehr Instrumente an Bord und hat so einen deutlich umfassenderen Blick auf die Sonne. Insbesondere muss Parker Solar Probe ohne Instrumente auskommen, welche die Sonne abbilden. In solcher Nähe zu unserem Zentralgestirn und damit in extremer Hitze lassen sich Teleskope und Kameras nicht betreiben, sie würden schlicht verdampfen. Mit Hilfe der Fernerkundungsinstrumente von Solar Orbiter können die Wissenschaftsteams beider Missionen deshalb bestens die Eigenschaften des Sonnenwinds mit den Vorgängen auf der Oberfläche und in der Korona in Beziehung setzen.

## Die Heizung der Korona

Der detaillierte Blick von Solar Orbiter in die Korona, die äußere Atmosphäre der Sonne, soll zudem ein weiteres Rätsel lösen: Wie ist es möglich, dass das Plasma in der Korona eine Temperatur von un-



**Solar Orbiter verfügt über einen Hitzeschild zum Schutz der Sonde und der Instrumentierung vor der Gluthölle der Sonne. Der Anstellwinkel der Solarpaneele ist gegenüber der Sonneneinstrahlung einstellbar, um eine Überhitzung der Solarzellen zu vermeiden. Die Öffnungen der Fernerkundungsinstrumente haben drehbare Verschlussklappen.**

vorstellbaren einer Million Grad Celsius erreicht? Schließlich befindet sich die äußerste Schicht der Sonnenatmosphäre deutlich weiter vom hitzespendenden Kern der Sonne entfernt, als etwa die Photosphäre, die sichtbare Sonnenoberfläche. Diese ist mit etwa 6000 Grad Celsius vergleichsweise kühl.

Es gibt eine Reihe von Erklärungsversuchen für das auf den ersten Blick verdrehte Temperaturgefälle: Die Forscher ziehen unter anderem Stoßwellen, magnetohydrodynamische Wellen und lang gezogene Plasmastrukturen in Erwägung; letztere werden als Spikulen bezeichnet. Darüber hinaus gibt es weitere magnetische Phänomene, die als Energielieferanten in Frage kommen. Eine umfassende Theorie steht allerdings noch aus. Jedoch legen alle bisherigen Beobachtungen nahe, dass der Schlüssel zum Verständnis in den magnetischen Strukturen an der Sonnenoberfläche liegt.

## Mit vereinten Kräften

Solar Orbiter blickt mit sechs Instrumenten, von denen jedes auf eine bestimmte Aufgabe spezialisiert ist, auf die Sonne (siehe Kasten links). Das Doppelteleskop PHI, der »Polarimetric and Helioseismic Imager«, das unter Leitung des MPS entwickelt und gebaut wurde, enthüllt die Struktur des Magnetfelds in der Photosphäre. Dies ist quasi die Basis der darüber liegenden Strukturen der Sonnenatmosphäre. Das Instrument misst die Polarisation der Strahlung sowie die Strömungsgeschwin-

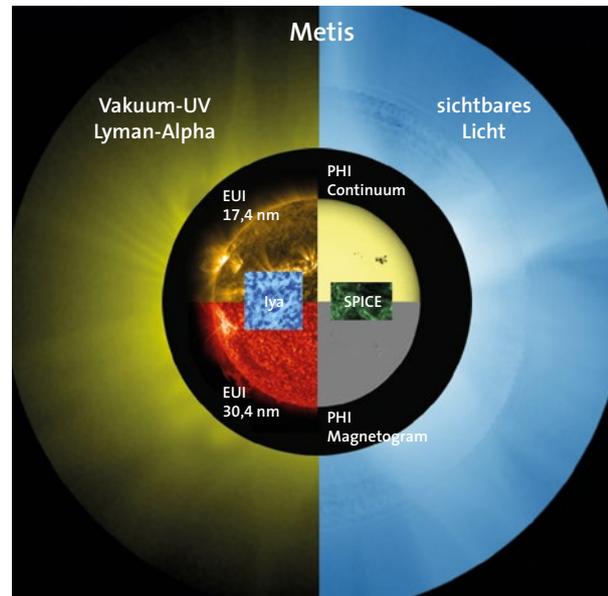
digkeit des Plasmas an der sichtbaren Oberfläche unseres Sterns. Die Bildverarbeitung des Bordcomputers berechnet daraus mit einem ausgeklügelten Algorithmus die Stärke und Richtung der Magnetfelder sowie die Bewegungen des Plasmas – sogar im Inneren der Sonne.

Die drei Teleskope von EU1, dem »Extreme Ultraviolet Imager«, liefern Ultraviolettaufnahmen der Korona in unterschiedlichen Wellenlängenbereichen. So bildet das vom MPS entwickelte Lyman-Alpha-Teleskop die Sonne in der Resonanzlinie des Wasserstoffs ab, dem häufigsten Element auf der Sonne. Die EU1-Teleskope liefern Bilder im Sekundentakt und können so schnell veränderliche Prozesse sichtbar machen. Während eines der drei Spiegelteleskope von EU1 die gesamte Sonnenscheibe im Blick behält, nehmen die beiden weiteren hochauflösenden Bilder ausgewählter Regionen auf.

SPICE, »Spectral Imaging of the Coronal Environment«, hingegen spaltet die ultraviolette Strahlung aus der Korona in ihre einzelnen Wellenlängen auf. Dem daraus erzeugten Spektrum lassen sich sehr detaillierte Informationen über die Zusammensetzung, die Dichte sowie Temperatur und Geschwindigkeiten der Komponenten des Sonnenplasmas entnehmen.

Das Instrument STIX, »Spectroscopy/ Telescope for Imaging X-rays«, blickt ebenfalls in die Korona. Das Röntgenteleskop bildet Röntgenstrahlung mit Energien zwischen 4 und 150 Kiloelektronenvolt ab. Diese Strahlung ist nur in den aktiven

Anhand von Bilddaten von anderen Sonnensatelliten werden hier die zu erwartenden Aufnahmen von Solar Orbiter ab dem Jahr 2022 verdeutlicht: Gemeinsame Beobachtungen werden es erlauben, die Vorgänge auf der Sonnenoberfläche mit den Strukturen in der Korona zu verbinden und deren Ausbreitung in die umgebende Heliosphäre zu verfolgen.



Gebieten zu finden. Hier suchen die Astrophysiker den Ursprung der hochenergetischen Teilchen, die von den In-situ-Instrumenten gemessen werden.

Der Koronograf Metis, zu dem das MPS das Kamerasystem beigesteuert hat, und SoloHI, der »Solar Orbiter Heliospheric Imager«, schauen noch weiter nach außen: Metis liefert Informationen aus der Übergangsregion zwischen der heißen Korona und der innersten Heliosphäre, indem es sichtbares Licht und UV-Strahlung beobachtet, das von den Elektronen und Protonen im Sonnenwind gestreut wird. SoloHI wird darüber hinaus sowohl den gleichmäßigen Fluss als auch vorübergehende Strahlungen im Sonnenwind über ein extrem weites Sichtfeld abbilden.

### Ein raffinierter Plan

Die Wissenschaftler planen ganz genau die Beobachtungen von allen Instrumenten von Solar Orbiter und stimmen sie aufeinander ab. Dementsprechend sind die Sichtfelder der Instrumente PHI, EUI und SPICE so ausgerichtet, dass sie jeweils dieselbe Region auf der Sonne mit hoher Auflösung ins Visier nehmen. Eines der drei Teleskope von EUI, der »Full Sun Imager« FSI, hat immer die ganze Sonne im Blickfeld, damit es ebenso wie das Röntgenteleskop STIX solche Orte identifizieren kann, in denen Eruptionen zu erwarten sind.

Die Koordinaten solcher Regionen werden annähernd in Echtzeit an die Raumsonde und die Instrumente übermittelt. So können die Sonnenforscher den Solar Orbiter darauf ausrichten und die Instrumente ihr Beobachtungsprogramm

entsprechend anpassen. Die auserkorene Region wird im Detail untersucht und von den Kameras abgebildet (siehe Bilder oben).

### Eine heiße Aufgabe

Für alle Instrumente ist die enorme Hitze an ihrem Einsatzort eine Herausforderung. Bis zu 500 Grad Celsius werden an der sonnenzugewandten Seite der Sonde erwartet. Aus diesem Grund ist Solar Orbiter auf der Vorderseite mit einem Schutzschild ausgestattet, der die Hitze sehr gut wieder abstrahlt. Während die In-situ-Instrumente gut geschützt im Schatten des Hitzeschildes ihren Messungen nachgehen – einige davon an einem langen Ausleger, um die elektrischen und magnetischen Störungen vom Sondenhauptkörper zu minimieren – benötigen die Fernerkundungsinstrumente natürlich Sichtkontakt zur Sonne. Durch möglichst kleine Löcher, die sich bei Bedarf schließen lassen, blicken die Teleskope durch den Hitzeschild hindurch (siehe Bild S. 41).

In das Instrument SPICE darf dagegen die Sonnenstrahlung ungehindert eintreten. Eine eigens vom MPS entwickelte Spiegelbeschichtung, die für Licht fast aller Wellenlängen durchsichtig ist, ermöglicht es der Strahlung, das Instrument ungenutzt zu durchqueren und es dabei nur minimal aufzuheizen. Lediglich ein Teil der Ultraviolettstrahlung wird am Teleskopspiegel reflektiert und zu einem Spektrografen geführt. Die Temperaturen im Inneren von SPICE überschreiten so nicht mehr als 80 Grad Celsius.

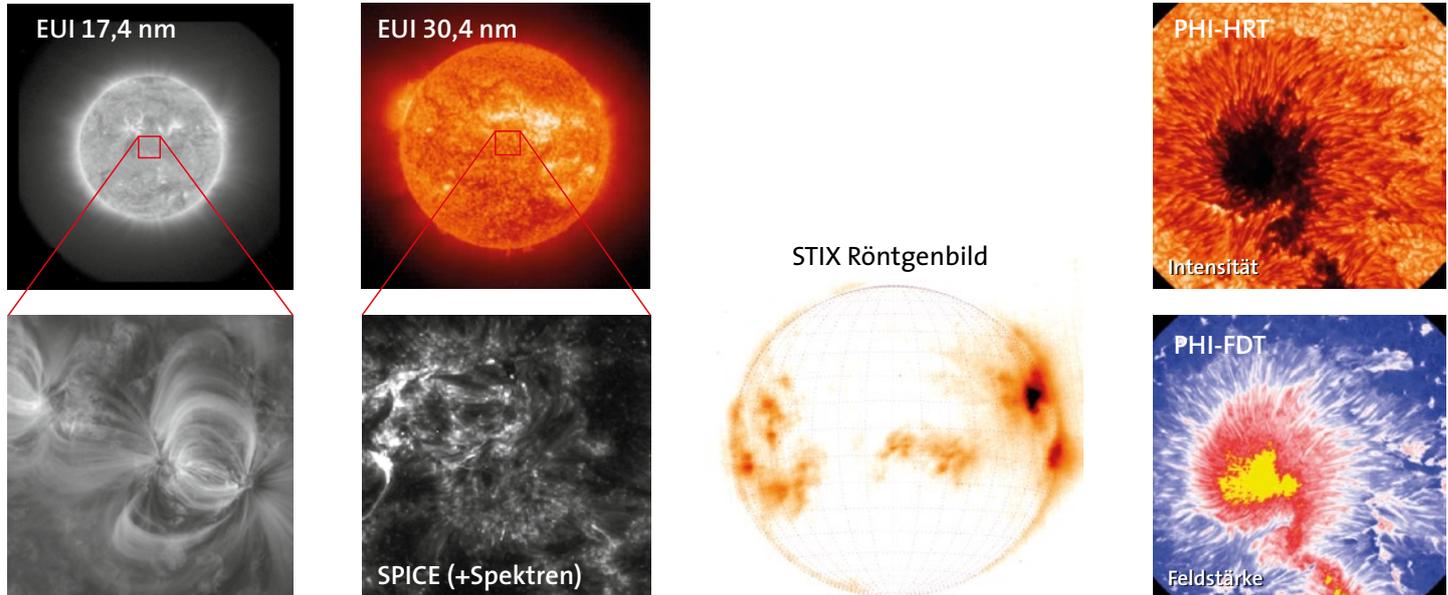
Die anderen Fernerkundungsinstrumente schützen sich durch spezielle Filter

in der Eintrittsöffnung vor dem Überhitzen. Durch diese kann lediglich ein kleiner Teil der Sonnenstrahlung das Innere des Instruments erreichen, so dass nur ein speziell gewählter Spektralbereich genutzt wird. So nehmen die drei Teleskope von EUI hochaufgelöste Bilder im extremen ultravioletten Spektralbereich auf. Jedes von ihnen ist mit einem speziellen Filter für die gewünschten Bereiche ausgerüstet und enthält zusätzlich spezielle Spiegelbeschichtungen, die nur für diesen Spektralbereich optimiert sind.

### PHI und die Magnetfelder

Für das Doppelteleskop PHI entwickelten die Forscher vom MPS zwei Wärmereflexionsfenster, die den Großteil des Energieflusses begrenzen und gleichzeitig den Durchtritt der gewünschten Strahlung ermöglichen. So durchdringt nur ein kleiner Ausschnitt des sichtbaren roten Lichts das Eintrittsfenster – gerade einmal vier Prozent der Gesamtstrahlung der Sonne. Dennoch stecken in diesem schmalen Wellenlängenbereich alle Informationen, die PHI benötigt, um die Magnetfelder an der Sonnenoberfläche zu bestimmen.

Zu diesem Zweck nutzt das Instrument die Eisenatome in der Sonne als Verbündete: Sie reagieren besonders empfindlich auf Magnetfelder und ändern in dessen Gegenwart geringfügig die Wellenlängen des ausgestrahlten Lichts. Dies wird als Zeeman-Effekt bezeichnet, benannt nach dem niederländischen Physiker Pieter Zeeman (1865–1943). Speziell das rote Licht, das die Atome abstrahlen, ist ein guter Indikator. Ohne Magnetfeld beträgt seine Wellenlänge 671,3 Nanometer. Kommt ein Mag-



netfeld ins Spiel, so werden zwei eng um diesen Wert zentrierte rote Wellenlängen gemessen. Je weiter sie auseinanderliegen, desto stärker ist das Magnetfeld. Das Eintrittsfenster von PHI lässt allein rotes Licht in der Nähe dieser Wellenlänge hindurch, um es dann genauer zu untersuchen.

Neben der genauen Wellenlänge geht es dabei um die Polarisation des Lichts, also die Richtung, in welcher die Lichtwellen schwingen. Verschiedene Schwingungsrichtungen – die Polarisationszustände – enthalten Informationen über die unterschiedlichen Richtungsanteile des Magnetfelds. Schritt für Schritt tasten beide Teleskope im Wechsel einen schmalen Wellenlängenbereich und verschiedene Polarisationszustände ab – und erhalten so ein Magnetogramm der Sonne, eine Art von magnetischer Landkarte.

Auf ähnliche Weise spürt das PHI einer weiteren Eigenschaft der Sonne nach: der Strömungsgeschwindigkeit des Plasmas an der Oberfläche. Wenn sich Atome vom Beobachter fort oder auf ihn zu bewegen, verändert sich die Wellenlänge des emittierten Lichts geringfügig. Dieser Dopplereffekt sorgt dafür, dass die Wellenlänge des roten Lichts der Eisenatome im Sonnenplasma je nach Bewegungsrichtung ein wenig zu größeren oder zu kleineren Wellenlängen verschoben ist. Aus diesen Verschiebungen können die Sonnenforscher die Geschwindigkeiten ermitteln, mit denen sich das Plasma auf den Beobachter zu oder von ihm fort bewegt. Auf diese Weise spürt das PHI den Magnetfeldern in den Polregionen nach und bestimmt dort die Rotationsgeschwindigkeit der Sonne.

Mit diesen Informationen gelingt es mit dem PHI sogar, auf indirekte Weise tief in die Sonne hineinzuschauen – und zwar bis in den Bereich unter der Oberfläche, in dem ihre Magnetfelder entstehen. Angetrieben von der Hitze im Kern steigen dort gewaltige Plasmaströme nach oben, kühlen ab und sinken wieder hinab. Durch diese Plasmaumwälzungen – Konvektion genannt – entstehen Schallschwingungen, die sich durch das Sonneninnere bis zur Oberfläche fortsetzen. Ähnlich wie Erdbebenwellen an der Erdoberfläche Rückschlüsse auf deren Ausbreitung im Innern des Planeten zulassen, erlauben Messungen der Plasmageschwindigkeit an der Sonnenoberfläche einen indirekten Blick auf die Schwingungen tief im Inneren unseres Sterns. In der Astrophysik ist das sogar eine eigene Forschungsdisziplin: die Helioseismologie.

Die entscheidende Region im Inneren bezeichnen die Wissenschaftler als Tachokline. Gemeint ist damit der Grenzbereich zwischen der Strahlungszone der Sonne, in welcher der Stern die gewaltigen Energiemengen aus dem Kern in Form von Strahlung nach außen leitet, und der darüber liegenden Konvektionszone mit ihrem auf- und abströmenden Plasma.

Während die Sonne in der Strahlungszone wie eine starre Kugel rotiert, ist die Drehbewegung der darüber gelegenen Konvektionszone komplexer: Regionen verschiedener heliografischer Breite rotieren mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten. An der Äquatorregion – 0 Grad heliografische Breite – benötigt die Sonne etwa 25 Tage für eine volle Umdrehung.

Bei 45 Grad heliografischer Breite sind es schon 27 Tage. In der Grenzregion zwischen starrer und differentieller Rotation entstehen starke Scherbewegungen. Sie verdrillen und verdrehen die Ströme im elektrisch geladenen Plasma, und genau dabei entstehen Magnetfelder. In einem Dynamoprozess verstärken sie sich selbst und erzeugen so das komplexe Magnetfeld, das wir bei der Sonne beobachten. Zudem ist möglicherweise ein zweiter, kleinskaliger Dynamo am Werk, der etwa durch turbulente Strömungen in oberflächennahen Schichten entstehen könnte. Wie dies genau funktioniert, ist noch unklar. Es ist eine Hauptaufgabe von Solar Orbiter mit seinem umfassenden Blick auf unser Zentralgestirn Licht ins Dunkel zu bringen.

Dieser Artikel und Weblinks unter: [www.sterne-und-weltraum.de/artikel/1735334](http://www.sterne-und-weltraum.de/artikel/1735334)



**UDO SCHÜHLE** ist Physiker am Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung (MPS) in Göttingen und war von Anfang an mit der Mission Solar Orbiter beschäftigt. Er ist Co-Principal Investigator des EUI-Instruments und Co-Investigator der Instrumente PHI, SPICE und Metis.



**BIRGIT KRUMMHEUER** ist Physikerin und leitet die Pressestelle am MPS in Göttingen.