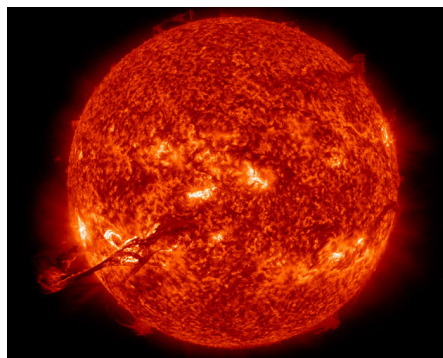


Ballonmission Sunrise: Eine Reise zur aktiven Sonne

Die Sonne ist ein gewaltiger Feuer-spucker: Immer wieder schleudert sie in heftigen Eruptionen geladene Teilchen und Strahlung ins All. Auf der Erde kann dies zu Stromausfällen führen oder Satelliten lahmlegen.



Das solare Feuerwerk Foto: NASA

Den Antrieb für das solare Feuerwerk vermuten Forscher in den Magnetfeldern der Sonne.

Um diese zu untersuchen, schickten

Forscher des Max-Planck-Instituts für Sonnensystemforschung (MPS) im Juni 2009 und 2013 das ballongetragene Sonnenobservatorium Sunrise auf seine ungewöhnliche Reise. Aus einer Flughöhe von mehr als 35 Kilometern hatten das Teleskop und die weiteren Instrumente an Bord die Sonne jeweils fast sechs Tage lang im Blick. Die Daten, die die Forscher sammelten, zeigen die Magnetfelder der Sonne in bisher unerreichter Genauigkeit - dank des größten Sonnentelekops, das jemals den Erdboden verlassen hat.

Entgegen allen Erwartungen zeigte sich die Sonne 2009 von ihrer ruhigen Seite: Sonneneruptionen und -flecken konnte Sunrise nicht beobachten. Vier Jahre später befand sich die Sonne in einer Phase hoher Aktivität. Dies war die richtige Zeit für einen erneuten Flug. Im Sommer 2013 startete Sunrise deshalb zu seiner zweiten Mission: einer Reise zur aktiven Sonne.

Zwischen Himmel und Erde

Das Einzigartige am Sonnenobservatorium Sunrise ist sein Beobachtungsstandort zwischen Himmel und Erde: In einer Höhe von mehr als 35 Kilometern lässt Sunrise den größten Teil der Erdatmosphäre unter sich zurück. Diese gewaltigen Luftmassen erschweren die Sonnenbeobachtung mit erdgebundenen Teleskopen beträchtlich. Da die Luft ständig in Bewegung ist, verwackeln alle Aufnahmen. Hohe Auflösungen lassen sich von der Erdoberfläche aus deshalb nur schwer und nur für wenige Sekunden erreichen. Ein weiterer Vorteil: Die ultraviolette (UV-)Sonnenstrahlung, welche von der Erdatmosphäre zum größten Teil geschluckt wird und die wichtige Informationen über unseren Stern enthält, steht Sunrise uneingeschränkt zur Verfügung.

Zwar böte eine Weltraummission dieselben Vorteile. Doch wäre es aus Kostengründen nur schwer möglich, ein so großes, leistungsfähiges Sonnen-

teleskop ins All zu bringen. Der riesige, mit Helium gefüllte Ballon bläht sich beim Aufstieg auf und erreicht in 35 Kilometern Höhe einen Durchmesser von 130 Metern.

Erstflug im Sommer 2009 im nord-schwedischen Kiruna: Beim Start richtet sich der mit Helium gefüllte Ballon zunächst langsam auf. Erst wenn er genau senkrecht über dem Sonnenobservatorium Sunrise steht, gibt das Startfahrzeug seine Last frei und Sunrise steigt in den Himmel.

Foto: MPS (B. Chares)



Das Sonnenobservatorium Sunrise im Überblick

1 Die Gondel

Das Sonnenobservatorium ist insgesamt sechs Meter breit und sieben Meter hoch - und dennoch ein Leichtgewicht. Sunrise wiegt gerade einmal 2 Tonnen. Zusammen mit dem Heli-umballon, seiner Füllung und dem Fallschirm beläuft sich das Gewicht auf etwa sechs Tonnen. Verantwortlich für das geringe Startgewicht ist vor allem die filigrane Strebenkonstruktion der Gondel aus Kohlefaser. Gleichzeitig ist diese Bauweise stabil genug, um die wackelige Reise in mehr als 35 Kilometern Höhe und die Landung zu überstehen.

3 Das Teleskop

Das Teleskop ist das Herzstück von Sunrise. Mit einem Hauptspiegeldurchmesser von einem Meter ist es das größte Sonnenteleskop, das jemals den Erdboden verlassen hat. Dabei muss es besonderen Anforderungen genügen: Zum einen muss es möglichst leicht und gleichzeitig stabil sein. Dafür sorgt die offene Strebenkonstruktion aus Kohlefaserkomponenten sowie die spezielle Bauweise des Hauptspiegels, der aus Glaskeramik gefertigt wurde. Extrem dünn poliert und an seiner Rückseite mit einer filigranen Wabenstruktur ausgestattet, wiegt er gerade einmal 45 Kilogramm. Zum anderen darf das Teleskop nicht überhitzen.

Haupt- und Sekundärspiegel könnten sich sonst verformen. Da in mehr als 35 Kilometern Höhe die Luft zu dünn ist, um effektiv zu kühlen, besteht das Teleskop aus Materialien, die wenig Hitze aufnehmen. Zudem verfügt es über ein ausgeklügeltes System zur thermischen Kontrolle.

5 Landung und Dämpfung

Kurz vor der Landung wird der Heliumballon auf ein Funksignal hin von der Gondel abgetrennt. Wenig später öffnet sich ein Fallschirm, der das Observatorium zur Erde trägt. Um den Aufprall weiter zu dämpfen, ist die Gondel an ihrer Unterseite mit Wellpappe ausgerüstet. Diese Kombination aus Fallschirm und Dämpfung hat sich 2009 bei der Landung nach dem Erstflug bewährt. Die Gondel wurde zwar leicht beschädigt. Die wertvollsten Teile der Fracht hingegen, die Datenspeicher und das Teleskop mit seinem empfindlichen Hauptspiegel, blieben vollkommen unversehrt.

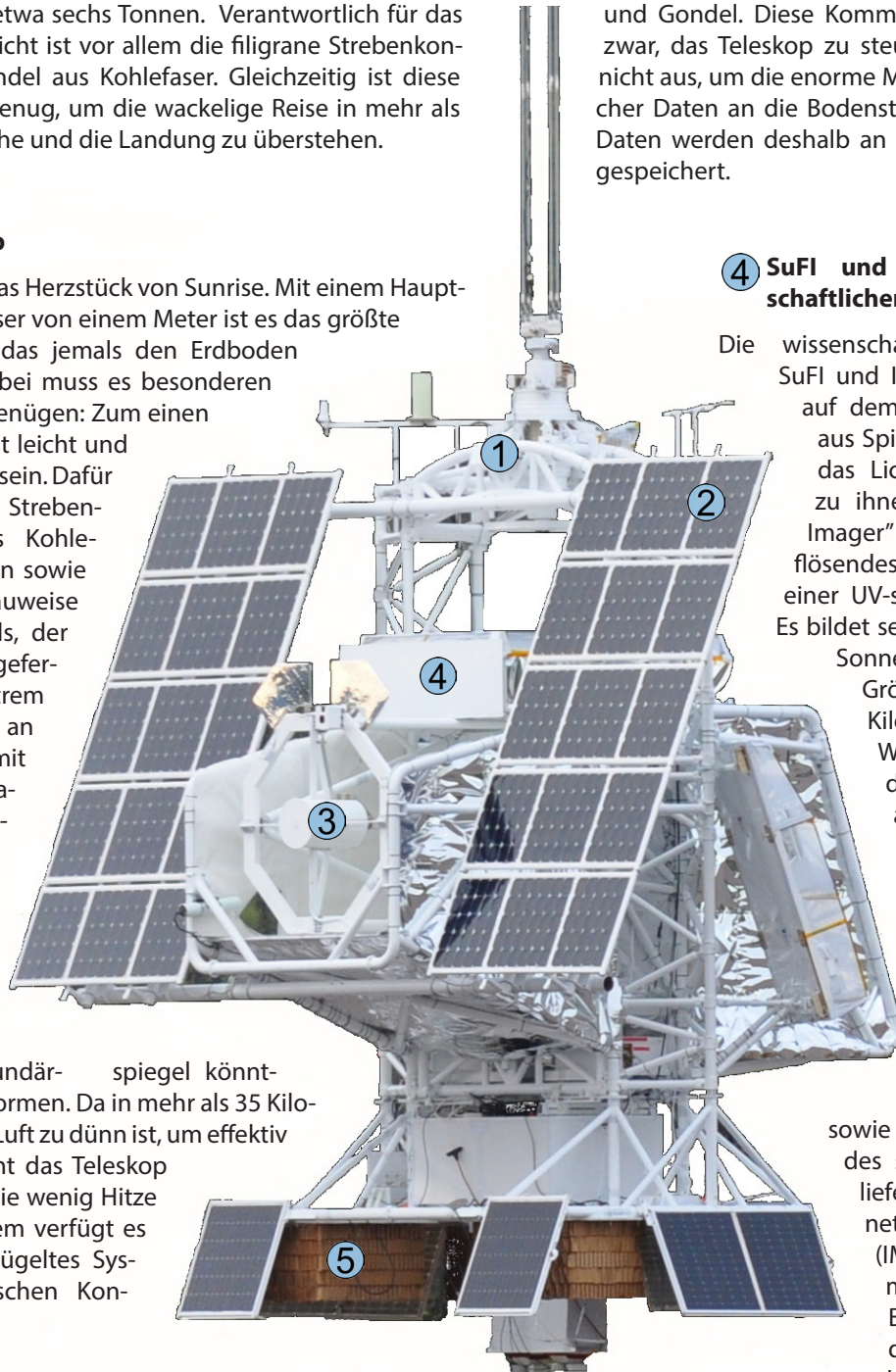
2 Energieversorgung und Kommunikation

Der auffälligste Bestandteil von Sunrise sind seine beiden großen Solarpanelen. Sie liefern den Bordstrom für Sunrise. Mehrere Funksysteme sichern die Kommunikation zwischen Boden und Gondel. Diese Kommunikation erlaubt es zwar, das Teleskop zu steuern. Sie reicht aber nicht aus, um die enorme Menge wissenschaftlicher Daten an die Bodenstation zu funken. Die Daten werden deshalb an Bord auf Festplatten gespeichert.

4 SuFI und IMAx: die wissenschaftlichen Instrumente

Die wissenschaftlichen Instrumente SuFI und IMAx reiten huckepack auf dem Teleskop. Ein System aus Spiegeln und Linsen leitet das Licht aus dem Teleskop zu ihnen. Der "Sunrise Filter Imager" (SuFI) ist ein hochauflösendes optisches System mit einer UV-sensiblen CCD-Kamera. Es bildet selbst Strukturen auf der Sonnenoberfläche mit einer Größe von weniger als 100 Kilometern in mehreren Wellenlängenbereichen des ultravioletten Lichts ab. Diese Wellenlängen können die Atmosphäre der Erde nicht durchdringen und sind deshalb von der Erdoberfläche aus unzugänglich. Aussagen über die Geschwindigkeit des Sonnenplasmas sowie Stärke und Richtung des solaren Magnetfeldes liefert das "Imaging Magnetograph Experiment" (IMaX). An jedem seiner mehr als eine Million Bildpunkte werden dazu mehrere unterschiedliche Wellenlängen

und Polarisationszustände des Lichtes aufgenommen. Die Messungen müssen möglichst unter identischen Bedingungen und deshalb rasch aufeinander folgen. Am Erdboden wäre dies wegen der wabernden Erdatmosphäre nicht möglich. Auch für Sunrise in seiner schaukelnden Ballongondel musste ein aufwändiger optischer Bildstabilisator entwickelt werden.



Die Flugroute: Von Schweden nach Kanada

Im Sommer scheint die Sonne nördlich des Polarkreises 24 Stunden am Tag. Die Mitternachtssonne bietet Sunrise die Möglichkeit, unseren Stern ununterbrochen zu beobachten. Ausgangspunkt der Reise war der Welt-raumbahnhof Esrange im schwedi-schen Kiruna. Von dort trugen die Winde in der Stratosphäre das Observatorium über den Atlantischen Ozean bis nach Kanada, wo es auf der Insel Somerset landete.

Auch der Zweitflug startete in Kiruna. Da die Stratosphärenwinde recht stabil wehen, war die Reiseroute sehr ähnlich.

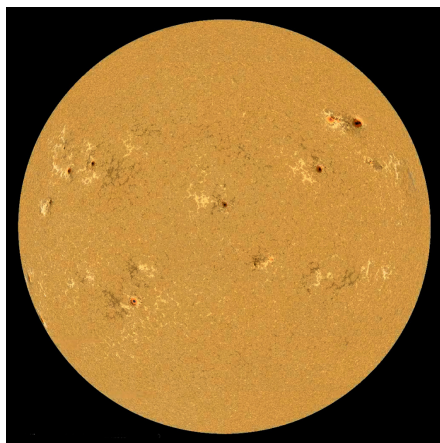


Die fast sechstägigen Flüge führten Sunrise von Nordschweden bis nach Kanada. *Grafik: Wikimedia/MPS*

Die Magnetfelder der Sonne

Die Sonne ist ein ausgesprochen dynamischer Stern. In einem etwa elf-jährigen Zyklus wechseln sich ruhige Phasen mit Phasen höherer Aktivität ab. Ein Maß für diese Aktivität ist etwa

sich diese gewaltigen Umwälzungen durch die so genannte Granulation bemerkbar: ein blasenartiges Muster mit Strukturen von etwa 1000 Kilometern Größe. In den hellen Blasen steigt das Plasma auf, an den dunkleren Rändern sinkt es wieder herab. Allein unterhalb der Sonnenflecken, deren Größe dem Durchmesser der Erde entsprechen kann, ist diese Bewegung unterdrückt. Dort erschweren besonders starke Magnetfelder das Aufsteigen des Plasmas.



In den Bereichen der Sonnenflecken ist das solare Magnetfeld besonders stark. *Bild: NASA/SDO*

die Anzahl der Sonnenflecken, welche die sichtbare Oberfläche der Sonne überziehen. Auch zu Sonneneruptionen, gewaltigen Ausbrüchen geladener Teilchen und Strahlung von der Sonnenoberfläche, kommt es in Phasen hoher Aktivität vermehrt.

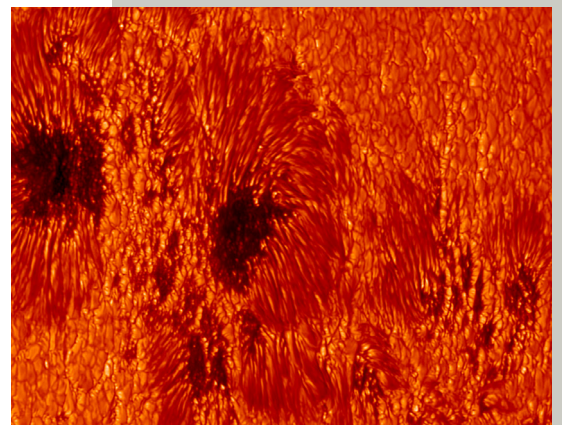
Ursache all dieser Phänomene ist das Magnetfeld der Sonne. Es entsteht tief in ihrem Innern. In der so genannten Konvektionszone, die sich über das äußere Drittel des Sonnenradius erstreckt, steigt heißes Plasma auf, kühlt sich ab und sinkt wieder in die Tiefe. Die zum Teil turbulenten Strömungen der elektrisch geladenen Sonnenmaterie erzeugen ein Magnetfeld in einer Art Dynamoprozess.

An der sichtbaren Oberfläche machen

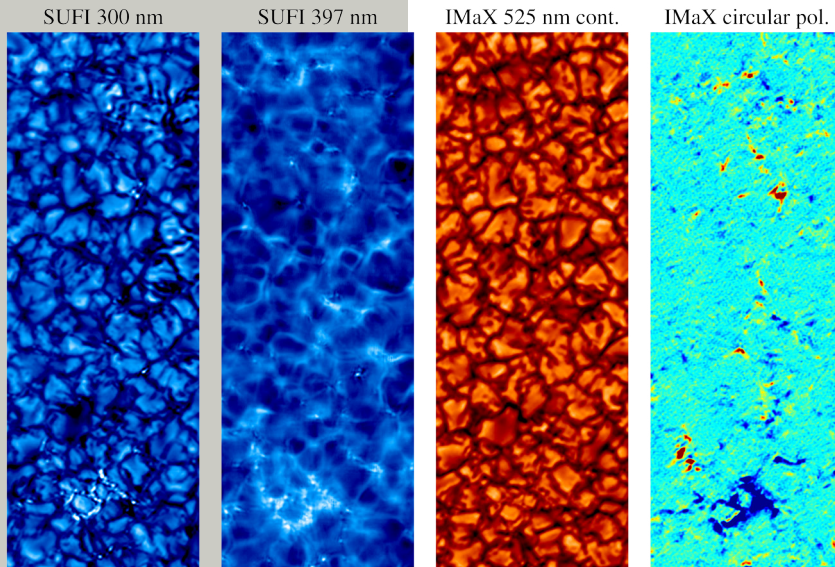
Überall sonst nimmt das Magnetfeld Energie aus dem brodelnden Plasma auf, transportiert sie bis in die höheren Schichten der Sonnenatmosphäre und setzt sie in Sonneneruptionen explosiv frei. Um diesen Energietransfer zu verstehen, muss man die Struktur des Magnetfeldes an der Sonnenoberfläche und seine Wechselwirkung mit den Plasmaströmen untersuchen. Dabei zeigt sich, dass diese Prozesse auf Skalen von weniger als 100 Kilometern stattfinden.

Messungen und Computersimulationen deuten darauf hin, dass die magnetischen Felder die Sonnenoberfläche in erster Linie in der Form hochkonzentrierter Flussröhren durchdringen. Die Stärke des Magnetfeldes kann hier lokal die des Erdmagnetfeldes um das Tausendfache übertreffen. Zudem spricht vieles für ein weit verbreitetes turbulentes Magnetfeld, das in einem räumlich eng begrenzten Dynamoprozess durch Plasmaströme nahe der Oberfläche ständig auf- und abgebaut wird.

Ein detaillierter Blick auf einen Sonnenfleck. *Foto: MPS*



Ein einzigartiger Blick auf die Sonne - Ergebnisse der Sunrise-Flüge



Die Instrumente SuFI und IMaX zeigen die Granulation der Sonnenoberfläche in verschiedenen Wellenlängen. Die weißen Bereiche im linken Bild entsprechen einzelnen magnetischen Flussröhren. Diese gehen mit hohen magnetischen Feldstärken einher (rechtes Bild).
Bild: MPS

Nützliche Links:

Videos vom Start 2009:
<http://www.youtube.com/watch?v=d4Rz7c0NJSE>

Partner:

High Altitude Observatory:
<http://www.hao.ucar.edu/>

Kiepenheuer-Institut für Sonnenphysik: <http://www.kis.uni-freiburg.de/>

Instituto de Astrofísica de Canarias und spanisches IMaX-Konsortium: <http://www.iac.es>

Lockheed-Martin Solar and Astrophysics Laboratory: <http://www.lmsal.com/>

Columbia Scientific Ballooning Facility der NASA: <http://www.csbf.nasa.gov/>

Das MPS dankt der **Max-Planck-Förderstiftung** und den **Fördernden Mitgliedern der Max-Planck-Gesellschaft** für ihre finanzielle Unterstützung des Projektes.

Die Daten, die beim Erstflug von Sunrise im Juni 2009 gewonnen werden konnten, enthalten völlig neue Erkenntnisse über unsere Sonne. Sunrise ist es erstmals gelungen, Details auf der Sonnenoberfläche mit einer Größe von weniger als 100 Kilometern in ultraviolettem Licht abzubilden und so die Grundbausteine des solaren Magnetfeldes besonders deutlich sichtbar zu machen und zu untersuchen.

In diesem Wellenlängenbereich zeigen Daten des Sunrise Filter Imagers (SuFI) helle Punkte in den ansonsten dunklen Bereichen zwischen den Granulen. Messungen mit dem Magnetographen IMaX beweisen, dass dort das Magnetfeld besonders stark ist. Theoretische Berechnungen legen nahe, dass die hellen Punkte auf einzelne magnetische Flussröhren in der Photosphäre, die Grundbausteine des solaren Magnetfelds, hinweisen. Das Magnetfeld ist von besonderem Interesse, rührt von ihm doch die gesamte Sonnenaktivität her.

Auch zur Lösung eines weiteren Rätsels konnte Sunrise entscheidend beitragen: der so genannten Chromosphärenheizung. Diese äußere Schicht der Sonne ist mit bis zu 20.000 Grad deutlich heißer als die darunter gelegene Photosphäre. Schon lange vermuten Forscher, dass akustische Wellen für diese Temperaturverteilung verantwortlich sind. Sie entstehen durch die turbulenten Plasmaströme, die aus dem Innern der Sonne aufsteigen und wieder absinken. Während die langsamen Wellen an der Grenze zwischen

Photo- und Chromosphäre reflektiert werden, dringen die schnelleren in die Chromosphäre ein. Ihre Energie geben sie dort an das Chromosphärenplasma ab.

Die hohe Auflösung von Sunrise hat es ermöglicht, diesen akustischen Energiefluss genau zu vermessen. Es zeigte sich, dass mehr als die Hälfte der Energie, die die Chromosphäre als Strahlung in ihre Umgebung abgibt, zuvor von akustischen Wellen bereitgestellt wurde.

Auch beim zweiten Sunrise-Flug im Juni 2013 gelang es, die Chromosphäre in ultraviolettem Licht mit sehr hoher Auflösung darzustellen. Da die Sonne bei diesem Flug aktiver war als noch beim Erstflug, konnten nun auch Strukturen in der Nähe von Sonnenflecken untersucht werden. Intensiver als in früheren Aufnahmen erscheinen in diesen Bereichen einige hundert Kilometer große Strukturen wie etwa helle Punkte oder langgezogene Fibrillen.

Besonderes Augenmerk legten die Forscher auf ultraviolette Strahlung mit einer Wellenlänge von 279,6 Nanometern, denn nur Magnesiumatome in der Chromosphäre emittieren diese Strahlung. Obwohl Magnesium mit nur 0,0024 Prozent einen verschwindend geringen Teil der Sonnenmasse ausmacht, bietet es direkten Zugang zu dieser Region und kann dazu beitragen, die Rätsel der Chromosphäre zu lösen.

Diese ersten Auswertungen der neuen Daten sind vielversprechend. Sie beweisen, dass die ultraviolette Strahlung aus der Chromosphäre hervorragend geeignet ist, um feine Strukturen und Prozesse sichtbar zu machen. Die Forscher hoffen nun, dass die Datenauswertung weitere neue Erkenntnisse liefern wird.

Achim Gandorfer
Birgit Krummheuer

Max-Planck-Institut für
Sonnensystemforschung
Justus-von-Liebig-Weg 3
37077 Göttingen