

Hoch hinaus für die Sonnenforschung – das ballongetragene Observatorium *Sunrise*

Autor: Dr. Achim Gandorfer, Projektwissenschaftler für *Sunrise* am Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung, Katlenburg-Lindau

Am 8. Juni 2009 startete das Sonnenobservatorium *Sunrise* seine sechstägige ungewöhnliche Reise mit einem heliumgefüllten Stratosphärenballon von Lappland nach Nordkanada. Nach sechs Jahren Bauzeit stellte der erste wissenschaftliche Flug den Höhepunkt eines ehrgeizigen Projekts dar, das unter Federführung des Max-Planck-Instituts für Sonnensystemforschung im niedersächsischen Katlenburg-Lindau in Zusammenarbeit mit nationalen und internationalen Partnern entstand.



Abb. 1 : Vorbereitung für den Start auf der Raketen- und Ballonbasis ESRANGE bei Kiruna (Nordschweden). Der Ballon wird mit Helium gefüllt, während Sunrise startbereit am Kran des Startfahrzeugs hängt. Auf seiner „Reiseflughöhe“ von 37 km wird sich der Ballon auf etwa 130 m Durchmesser ausdehnen, um seine 2,6 t schwere Nutzlast zu tragen. Die Ballongondel mit ihren seitlichen Panels für die Solarzellen hat eine Höhe von etwa 7m.

Urheber: MPI für Sonnensystemforschung, S.K. Solanki

Wissenschaftlicher Hintergrund – die Sonnenaktivität: Die Erforschung unserer Sonne ist ein sehr aktuelles Teilgebiet der Astrophysik. Schließlich ist unser Zentralgestirn aus der Sicht eines Astrophysikers ein Stern wie jeder andere auch, allerdings mit der herausragenden Eigenschaft, dass wir ihn – bedingt durch seine Nähe – in einzigartiger Detailliertheit untersuchen können. Auf unserem Stern laufen komplexe physikalische Prozesse ab, deren Erforschung nicht nur Schlüsselinformationen über die Funktionsweise von Sternen liefert, sondern deren Prinzipien tiefe Einblicke in die Grundlagen der Plasmaphysik erlauben, der Physik heißer, elektrisch geladener Gase, die in ständiger Umwandlung von thermischer, mechanischer und magnetischer Energie existieren.

Dieses Wechselspiel zwischen Magnetfeldern und turbulenten Gasbewegungen wird durch die Gleichungen der Magnetohydrodynamik beschrieben und kann auf der Erde zwar mit enormem Rechenaufwand simuliert werden, eine direkte experimentelle Überprüfung im Labor ist aber nicht möglich. Die Sonne stellt daher ein wichtiges Labor dar, auf dem wir diese fundamentalen Prozesse studieren können.

Aber warum sind Wechselwirkungen zwischen Gasbewegungen und Magnetfeldern überhaupt wichtig?

Die Sonne beeinflusst in sehr direkter Art und Weise unser Leben auf der Erde. Sie ist die Energiequelle, die durch ihre Strahlung das thermale Gleichgewicht auf der Erde bestimmt. Eine der wichtigsten Fragen der heutigen Zeit ist diejenige nach den Ursachen des Klimawandels. Klimaforschung muss alle Einflussfaktoren in Betracht ziehen, und hier stellt sich auch die Frage nach solaren Einflüssen.

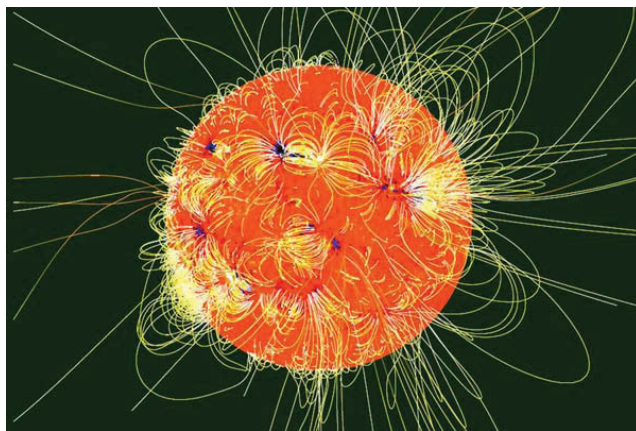


Abb. 2: Instabilitäten des Magnetfeldes auf der Sonnenoberfläche und in der Korona sind für Sonneneruptionen verantwortlich.

Urheber: MPI für Sonnensystemforschung

Wir wissen, daß die Sonne nicht so ruhig ist, wie sie auf den ersten Blick zu sein scheint. Die Atmosphäre der Sonne (ihre äußeren Schichten) ist sehr aktiv. Da sich das magnetische Feld der Sonne ständig neu konfiguriert, kommt es zu magnetischen Kurzschlüssen, die nicht nur einen erheblichen Beitrag zum Energiehaushalt der äußeren Sonnenatmosphäre, der Korona, darstellen, sondern die auch zur Freisetzung von starker Teilchenstrahlung führt. Trifft eine solche Wolke aus geladenen Teilchen die Erde, so kann es empfindliche Auswirkungen auf unsere hoch technisierte Gesellschaft haben: Kommunikations- oder wissenschaftliche Satelliten können zerstört und der Flugverkehr beeinträchtigt werden, selbst ein Zusammenbruch des Stromnetzes ist möglich und schon vorgekommen.

Das solare Magnetfeld als Quelle ihrer Aktivität: Die Wurzel aller magnetischen Aktivität liegt verborgen in den tieferen Schichten der solaren Atmosphäre, in der so genannten Photosphäre. Hier in der sichtbaren Oberfläche der Sonne zeigt sich die gesamte Komplexität der Wechselwirkung zwischen konvektiven Gasströmungen und Magnetismus am deutlichsten (siehe Abb. 3). Die Grundbausteine des solaren Oberflächenmagnetfelds sind nur einige 10 km groß und entzogen sich daher unseren bisherigen Versuchen, sie isoliert zu untersuchen.

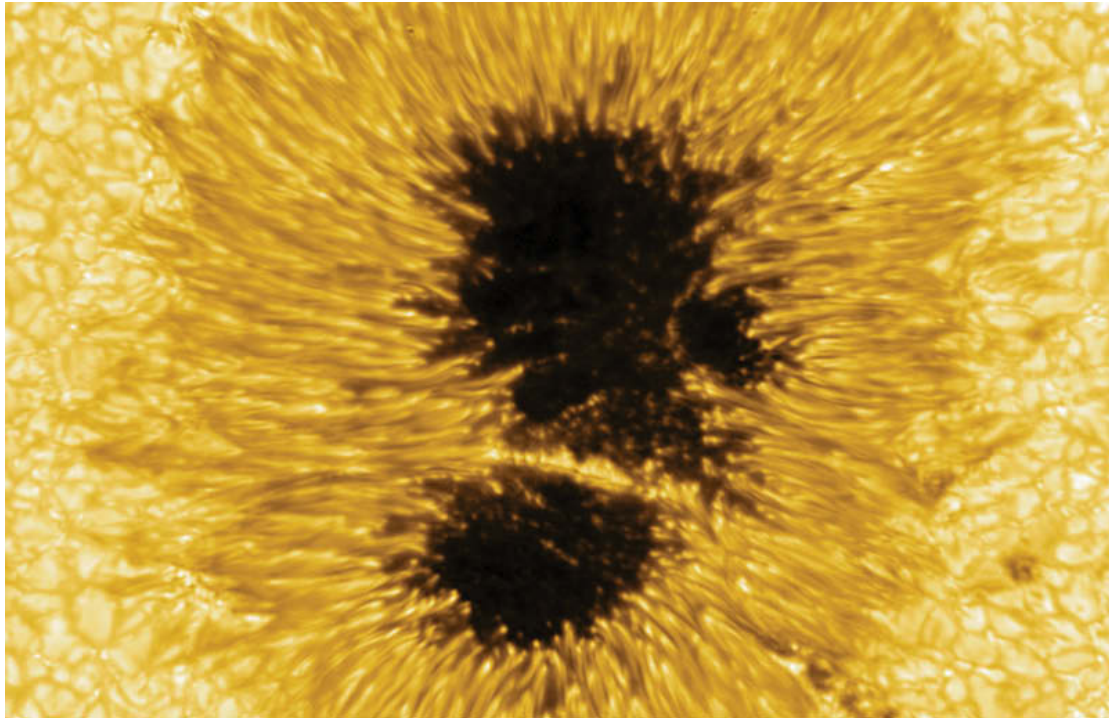


Abb. 3: Großer Sonnenfleck, der Anfang September 2004 auf der Sonne zu sehen war. Das Bildfeld umfasst ca. 45.000 mal 30.000 Kilometer auf der Sonne - die gesamte Erde würde also mehrfach in das Bild passen. Sonnenflecken erscheinen dunkel, weil das in ihnen durch die Sonnenoberfläche tretende starke Magnetfeld den Energietransport durch Gasströmungen unterdrückt. Die Aufnahme wurde von Vasily Zakharov mit dem 1-Meter-Sonnenteleskop auf der Insel La Palma gewonnen, das vom Instituts für Sonnenphysik der Königlichen Schwedischen Akademie der Wissenschaften betrieben wird. Neben dem Sonnenfleck ist klar die zellenartige Struktur der so genannten Granulation zu erkennen, einer konvektiven Strömung, die in ständiger Wechselwirkung mit Magnetfeldern steht. Die typische Zellgröße der Granulen ist etwa 1000km, während die kleinsten magnetischen Elemente, die sich als helle Strukturen zwischen den Granulen darstellen, nur einige 10km groß sind. Sie sind der Schlüssel zum Verständnis der solaren Aktivität.

Urheber: MPI für Sonnensystemforschung

Mission *Sunrise*: Die besten Detailaufnahmen der Sonnenoberfläche haben eine Winkelauflösung von etwa 0,1 Bogensekunde, das entspricht etwa 70 km auf der Sonne. Um die physikalische Struktur der magnetischen Elemente untersuchen zu können, ist es aber erforderlich, diese hohe Winkelauflösung auch in Verbindung mit spektroskopischen Methoden zu erreichen und über einen bestimmten Zeitraum zu halten. Nur so werden die physikalische Struktur und die Dynamik der Magnetfeldstrukturen quantitativ messbar. Diese Rolle soll das Ballonteleskop *Sunrise* übernehmen. *Sunrise* ist ein internationales Projekt unter wissenschaftlicher (*principle investigator*: Prof. Dr. Sami K. Solanki) und technischer (Dr. Peter Barthol) Leitung des Max-Planck-Instituts für Sonnensystemforschung (MPS) in Katlenburg-Lindau zur Entwicklung, dem Bau und dem Betrieb eines ballongetragenen Sonnenobservatoriums, mit dessen Hilfe die Sonne in bisher unerreichter Detailliertheit untersucht werden kann. Neben dem Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung sind an der Mission zahlreiche weitere Forschungseinrichtungen beteiligt: Das Kiepenheuer-Institut für Sonnenphysik in Freiburg, das High Altitude Observatory in Boulder (Colorado), das Instituto de Astrofísica de Canarias auf Teneriffa, das Lockheed-Martin Solar and Astrophysics Laboratory in Palo Alto (Kalifornien) und die Columbia Scientific Ballooning Facility der NASA. Der deutsche Beitrag zu *Sunrise* wird gefördert vom Bundesministerium für Wirtschaft und vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (Forschungskennzeichen 50 OU 0401) und durch den Innovationsfond des Präsidenten der Max-Planck-Gesellschaft.



Ein Teleskop am Ballon: Eine Winkelauflösung von 0,1 Bogensekunden setzt nicht nur ein Teleskop mit einem Durchmesser von mindestens 1m voraus, es muss auch mit der entsprechenden Genauigkeit auf die Sonne ausgerichtet und stabilisiert werden. Dies ist auf dem Erdboden nicht möglich, da die turbulente Erdatmosphäre die Bildqualität stark beschränkt. Auch die für die Sonnenphysiker wichtige nahe Ultraviolettstrahlung der Sonne kann den Erdboden nicht erreichen. Eine Lösung bietet der Flug mit einem Ballon, der das Teleskop, die wissenschaftlichen Instrumente sowie die Teleskopmontierung, die Stromversorgung, Steuerung und alle zum Betrieb des Observatoriums notwendigen Systeme bis in eine Höhe von über 35 km trägt.

Abb. 4 : Vom Ballon getragen steigt *SUNRISE* in den Himmel. Foto: MPS (P. Barthol)

Die Beobachtungsbedingungen in der Stratosphäre ähneln nahezu denen im freien Weltraum: Da man mehr als 99% der Erdatmosphäre unter sich lässt, stört keine Luftunruhe die Detailgenauigkeit der Bilder, und gleichzeitig hat man Zugang zum ultravioletten Licht zwischen 200 und 300 nm Wellenlänge, das am Erdboden wegen der Absorption durch das stratosphärische Ozon praktisch nicht ankommt. Eine Weltraummission wäre dagegen um ein Vielfaches teurer als ein Ballonprojekt, das zudem den Vorteil der Wiederverwendbarkeit bietet.

Solche Stratosphärenflüge werden zwar standardmäßig für wissenschaftliche Zwecke durchgeführt, neu ist allerdings die Größe und Komplexität der Mission *Sunrise*.

Instrumentierung von *Sunrise*: Das *Sunrise* Teleskop besitzt einen Hauptspiegel aus Glaskeramik mit 1m Durchmesser, der in extremer Weise gewichtsoptimiert wurde und nur noch 40 kg wiegt. Er bildet die Basis für ein Spiegelteleskop mit 25 m Brennweite, das über einen aktiven Sekundärspiegel verfügt. Ein Wellenfrontsensor an Bord misst die korrekte gegenseitige Ausrichtung der beiden Teleskopspiegel und sendet nötigenfalls Regelsignale an die Sekundärspiegelmontierung. Das Teleskop wurde unter Vertrag mit dem MPS von der Firma Kayser-Threde in München gebaut. Der Wellenfrontsensor wurde vom Kiepenheuer Institut für Sonnenphysik in Freiburg entwickelt, welches auch für die interne Bildberuhigung mit Hilfe eines schnellen Korrekturspiegels verantwortlich zeichnet. Mit Hilfe dieses Bildberuhigers können residuelle Störungen und Vibrationen im Gesamtsystem ausgeglichen werden.

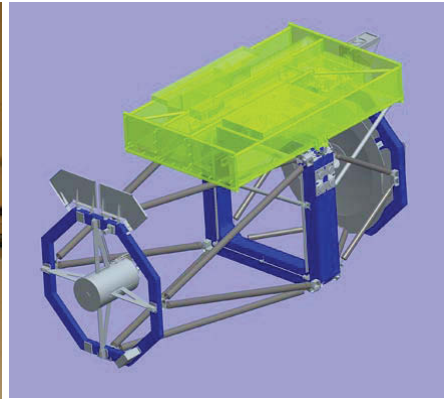
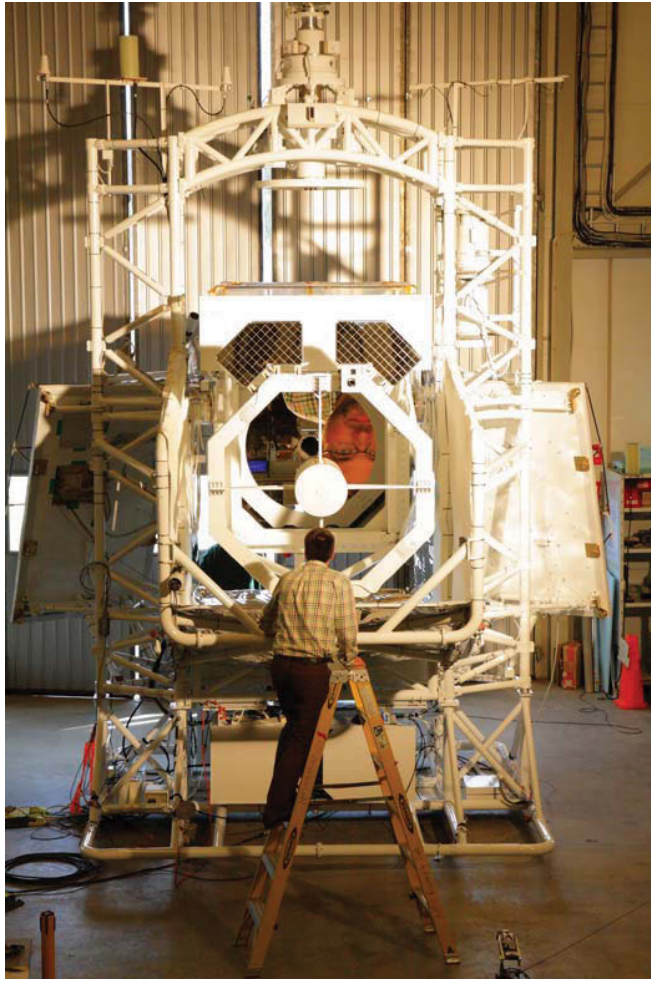


Abb. 5: Links: Blick in das Sunrise Teleskop auf den 1m großen Glaskeramik-Hauptspiegel. Durch eine zentrale Bohrung wird das Sonnenbild, das vom Sekundärspiegel nachvergrößert wird, zur Analyse über zwei Umlenkspiegel in die Instrumentenplattform (oben auf dem Teleskop als weiße Kiste sichtbar) gelenkt. Das Teleskop wurde von der Firma Kayser-Threde in München gebaut (oberes Bild). Die Instrumentenplattform (im oberen Bild grün eingefärbt) ist am MPS entwickelt und gebaut worden. Das Gerüst der Gondel, gebaut vom High Altitude Observatory in Boulder, USA, dient als Montierung des Teleskops und erlaubt die Ausrichtung und Stabilisierung des Teleskops im Flug.

Urheber: MPI für Sonnensystemforschung

Die wissenschaftlichen Instrumente umfassen eine hochauflösende CCD Kamera, die Detailaufnahmen der Sonne in verschiedenen Wellenlängenbändern zwischen 210 nm und 400 nm aufnimmt. Die verschiedenen Wellenlängenbänder werden durch schmalbandige Farbfilter in einem Filterrads ausgewählt. Ein weiteres Instrument ist IMaX. IMaX steht für „imaging magnetograph experiment“ und ist ein durchstimmbares abbildendes Fabry Perot Interferometer mit einer auf Flüssigkristallen basierenden Polarisationsanalyseeinheit. Sie dient der Analyse der Polarisation einer bestimmten durch das Instrument selektierten Spektrallinie. Denn die solaren Magnetfelder kodieren ihre Stärke und Richtung über den Zeeman Effekt in die Polarisation der Spektrallinien des Sonnenspektrums ein; die Beobachtung dieser Polarisation erlaubt also die Messung des solaren Magnetfeldes. IMaX wird von einem spanischen Konsortium aus wissenschaftlichen Instituten unter Führung des „Instituto di Astrofísica de Canarias“ auf Teneriffa entwickelt und gebaut.

All diese Instrumente werden über eine Zwischenoptik an das Teleskop angebunden. In dieser optomechanischen Einheit sind auch das System zur Bildberuhigung und der Wellenfrontsensor untergebracht. Dieses hochkomplexe optische System muss die gleichzeitige Versorgung der wissenschaftlichen Instrumente sicherstellen, auch unter den widrigen Bedingungen eines stratosphärischen Flugs. Das MPS war als Systemführer von **Sunrise** auch für die Entwicklung und den Bau dieser zentralen Einheit zuständig.

Der erste wissenschaftliche Flug von *Sunrise*: Am 8. Juni 2009 startete das größte Sonnenteleskop, das je den Erdboden verlassen hat, an einem heliumgefüllten Stratosphärenballon zu einem fast sechstägigen Flug in 37 km Höhe von Kiruna (Schweden) nach Somerset Island in Nordkanada, getragen von zirkumpolaren Windsystemen, die in diesen Breiten im Sommer vorherrschen.

Fast sechs Tage hatte das Observatorium die Sonne fest im ungetrübten Blick, Tag und Nacht, denn in den Polarregionen geht in dieser Zeit die Sonne nie unter.

Nach dem Ablösen des Ballons landete *Sunrise* am 14. Juni sicher an einem Fallschirm auf Somerset Island, einer großen Insel im kanadischen Territorium Nunavut an der Nordwestpassage, dem Seeweg durch das Nordpolarmeer zwischen Atlantik und Pazifik.

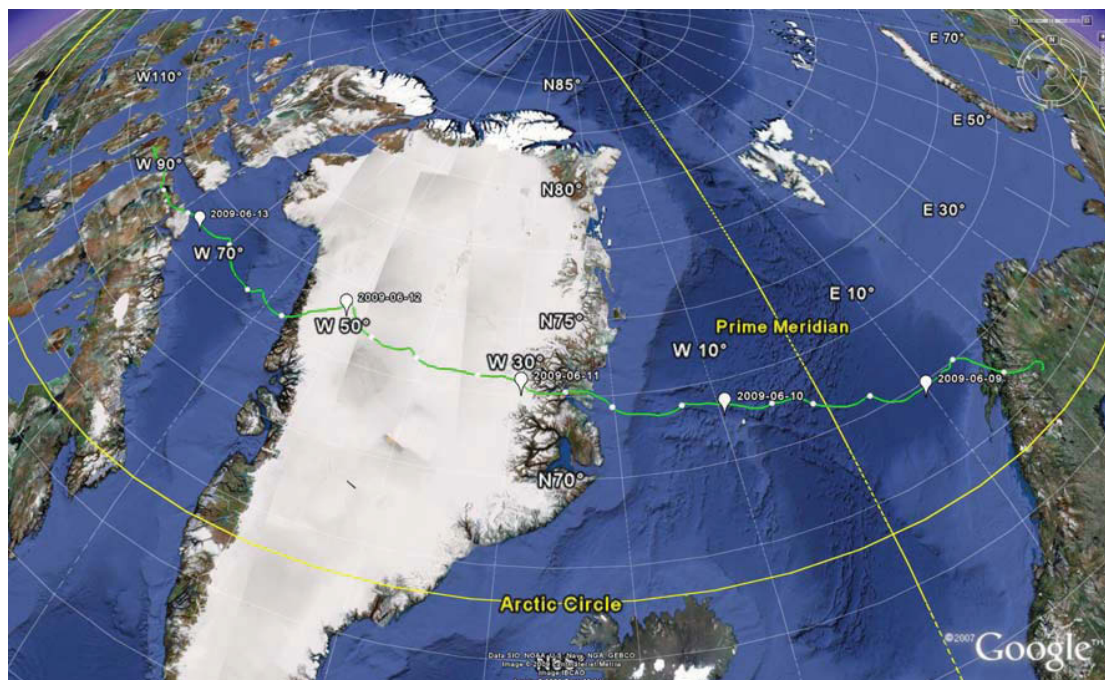


Abb. 6: Flugroute von *Sunrise* von ESRANGE nahe Kiruna (Schweden) am rechten Bildrand über Grönland nach Somerset Island in Nordkanada (links). Der nördliche Polarkreis ist als gelbe Linie dargestellt.

Urheber: MPI für Sonnensystemforschung und Google

Die Auswertung der insgesamt 1,8 Terabyte an Beobachtungsdaten, die *Sunrise* während seines Flugs aufzeichnete, ist in vollem Gange. Doch schon die ersten Ergebnisse versprechen, dass die Mission das Verständnis der Sonne und ihrer Aktivität einen großen Schritt voranbringen wird. Interessant ist vor allem der Zusammenhang zwischen Magnetfeldstärke und Helligkeit kleinster magnetischer Strukturen. Da das Magnetfeld in einem elfjährigen Aktivitätszyklus variiert, führt das vermehrte Auftreten dieser Grundbausteine zu einer Zunahme der solaren Gesamthelligkeit - mit der Folge eines erhöhten Wärmeeintrags auf die Erde. Besonders ausgeprägt ist die Schwankung der Sonnenstrahlung im ultravioletten Licht. Dieses erreicht nicht den Erdboden, sondern wird in der Ozonschicht verschluckt und heizt sie auf. Während des Flugs in der Stratosphäre hat *Sunrise* zum ersten Mal die hellen magnetischen Strukturen auf der Sonnenoberfläche in diesem wichtigen Spektralbereich zwischen 200 und 400 Nanometer (millionstel Millimeter) Wellenlänge untersucht.

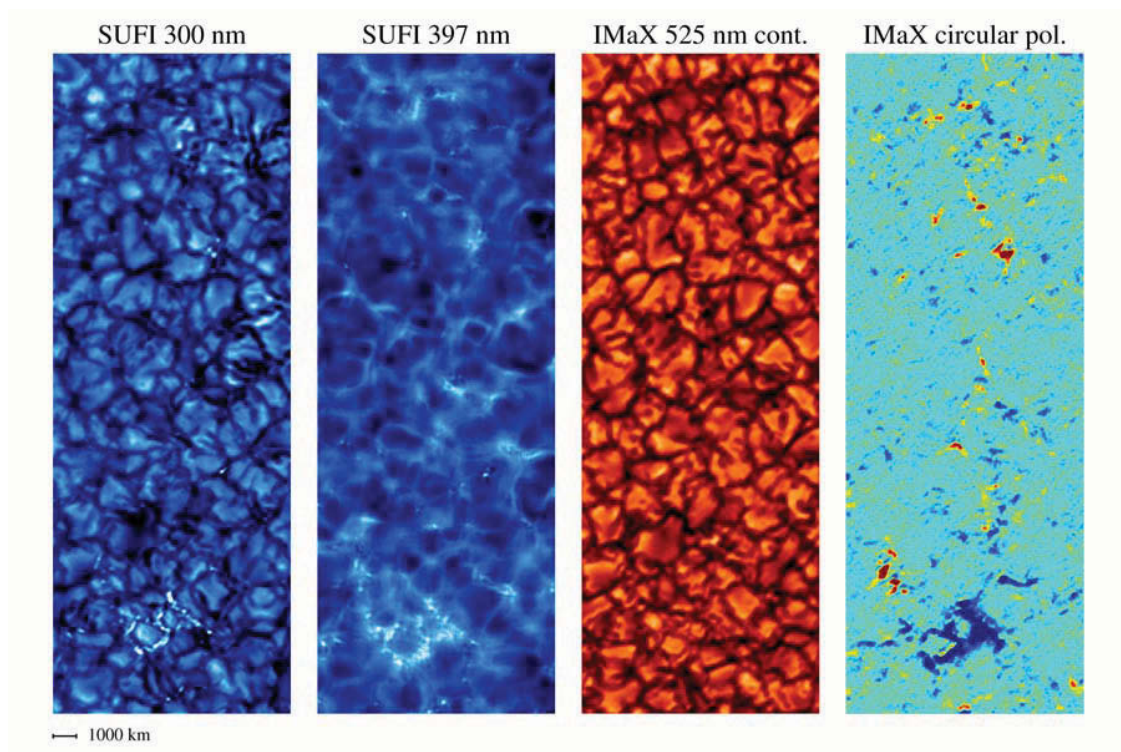


Abb. 6: Erste Bilder von den *Sunrise*-Instrumenten. Die Aufnahmen zeigen jeweils den gleichen kleinen Ausschnitt der Sonnenoberfläche (etwa 1/20000 der Gesamtfläche). Links außen: SuFI-Bild bei 300 nm Wellenlänge (UV-Licht); Mitte links: SuFI-Bild bei 397 nm Wellenlänge in einer Spektrallinie des ionisierten Kalziums; Mitte rechts: IMaX-Bild bei 525 nm Wellenlänge (sichtbares Licht); rechts außen: IMaX-Karte des vertikalen Magnetfelds. Die Farbskala reicht von Blau (nach innen gerichtetes starkes Magnetfeld) über Türkis (sehr schwaches Feld) bis Rot (nach außen gerichtetes starkes Feld). Die Grundstruktur der Intensitätsbilder zeigt das Muster der aufsteigenden hellen heißen Gasblasen und dunklen kühlen Abströmungen, welche die Energie aus dem Sonneninneren nach außen transportieren. Der Vergleich zwischen den Intensitätsbildern und der magnetischen Karte zeigt, dass den hellen Punkten mit Durchmessern von ca. 100 km, die besonders gut in den SuFI-Bildern zu erkennen sind, Gebiete mit starkem Magnetfeld entsprechen. Magnetfeld findet sich jedoch auch an vielen anderen Stellen der Oberfläche.

Urheber: MPI für Sonnensystemforschung und IMaX-Konsortium

Ausblick: Der erste Flug von *Sunrise* war ein großer Erfolg und erbrachte eine Ausbeute von zehntausenden von Bildern und magnetischen Karten. Erstmals können nun die zeitliche Entwicklung des komplexen Magnetfeldes, sein Zusammenhang mit Helligkeitsstrukturen und seine Wechselwirkung mit Strömungen mit der notwendigen Detailauflösung untersucht werden. Da die Sonne im Jahre 2009 ungewöhnlich inaktiv war, konnte Sunrise allerdings nur die „ruhige Sonne“ beobachten. Bei einem zweiten Flug im Jahre 2012 während hoher Sonnenaktivität können auch die spektakulären Sonnenflecken und magnetisch aktiven Gebiete unter die Lupe genommen werden, um den Geheimnissen der unruhigen Sonne und ihres Magnetfeldes weiter auf die Spur zu kommen.

Ein Wiederflug von *Sunrise* würde die wissenschaftliche Ausbeute des Projekts um ein Vielfaches steigern, wobei der dazu erforderliche Kostenaufwand nur einen Bruchteil der bisher investierten Entwicklungskosten ausmacht.



Abb. 7: Das flugbereite Observatorium mit einem Teil des internationalen Sunrise-Teams. Neben dem MPI für Sonnensystemforschung sind am Projekt beteiligt: das Kiepenheuer-Institut für Sonnenphysik in Freiburg, das High Altitude Observatory in Boulder (Colorado), das Instituto de Astrofísica de Canarias auf Teneriffa und weitere spanische Institute im IMAx-Konsortium, und das Lockheed-Martin Solar and Astrophysics Laboratory in Palo Alto (Kalifornien).

Urheber: MPI für Sonnensystemforschung

Über das MPS: Das Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung in Katlenburg-Lindau (Niedersachsen) erforscht das Sonnensystem, insbesondere die Umgebung der Erde, die Planeten und Kometen sowie die Sonne, ihre Heliosphäre und deren Wechselwirkung mit dem interstellaren Medium. Die Abteilung „Sonne und Heliosphäre“ deckt alle Bereiche der aktuellen Sonnenforschung ab: Von der Theorie bis zum Bau von weltraumgestützten Forschungsinstrumenten. Neben *Sunrise* arbeitet das Institut intensiv an der Planung der Instrumente für eine Beteiligung an der ESA Mission „Solar Orbiter“.