

Unser Heimatstern, die Sonne – wie wir sie vermessen und verstehen können

LISA-MARIE ZESSNER & PATRICK ONDRATSCHEK

Sonnenforschung, Weltraumwetter, Instrumentierung, numerische Simulationen

K u r z f a s s u n g : Mit Hilfe von hochmodernen Instrumenten kann die Sonne heutzutage in nie dagewesener Präzision beobachtet werden. Dabei liegen Forschungsschwerpunkte unter anderem auf dem Magnetfeld der Sonne. Dieses ist die Grundlage für den Sonnenwind und steht somit in direktem Zusammenhang mit der Auswirkung der Sonne auf das sogenannte Weltraumwetter. Teleskope, die sich entweder auf der Erde oder im Weltraum befinden, dienen hierbei als Forschungsgrundlage. Auf der anderen Seite dienen numerische Simulationen dazu, um die Messdaten zu interpretieren. Es ist das Zusammenspiel aus Beobachtung und Theorie, das unser Verständnis über die komplexen Schichten der Sonnenatmosphäre erweitert.

Our host star – how to observe and understand the Sun

Solar research, space weather, instrumentation, numerical simulations

A b s t r a c t : With the help of modern instruments, we can observe the sun with unprecedented precision. One of the major research topics is the solar magnetic field. It plays an important role in the origin of the solar wind and is therefore connected to the Sun's impact on the so-called space weather. Ground- and space-based telescopes form the basis of current research. On the other hand, numerical simulations are a helpful tool to interpret the observational data. It is the interplay of observation and theory which helps us to understand the complex solar atmosphere.

Inhaltsverzeichnis

1	Unsere Sonne im Überblick	234
1.1	Die Sonne hat viele Erscheinungsformen	234
1.2	Die verschiedenen Schichten der Sonnenatmosphäre	235
1.3	Die magnetische Aktivität der Sonne und ihre Auswirkungen auf das Weltraumwetter	238
2	Die Sonne beobachten	242
2.1	Das Lichtspektrum	242
2.2	Das Licht der Sonne beobachten	243
2.3	Erdgebundene Sonnentelkope	244
2.4	Weltraumteleskope	244
2.5	Der Kompromiss: ein ballongetragenes Teleskop	245
3	Beobachtungen interpretieren mit Hilfe von Simulationen	247
4	Ausblick	249
5	Literatur	250

1 Unsere Sonne im Überblick

Ohne sie könnten weder wir noch das restliche Leben auf der Erde bestehen. Ohne sie gäbe es weder die Erde noch unser gesamtes Planetensystem. Dennoch ist ihre Existenz für uns im Alltag selbstverständlich – egal, ob sie für uns gerade sichtbar ist oder nicht.

Die Rede ist von unserem Heimatstern, der Sonne. Ihr Licht erreicht uns Tag für Tag, Jahr für Jahr. Nichts ist für uns selbstverständlicher, als dass der rote Feuerball an unserem Himmel morgens auf und abends wieder untergeht. Doch wieviel wissen wir tatsächlich über unseren Heimatstern? Wie können wir etwas untersuchen, das sich 150 Millionen Kilometer von uns entfernt befindet? Und wieso ist es überhaupt wichtig für uns, die Sonne zu verstehen?

Die Sonne ist einer von ungefähr hundert Milliarden Sternen in unserer Galaxie. Vor fünf Milliarden Jahren hat sie sich aus dem Kollaps einer molekularen Gaswolke gebildet, zusammen mit unserem gesamten Sonnensystem. Die Sonne ist, verglichen mit den anderen Sternen unserer Milchstraße, ein relativ durchschnittlicher Stern: nicht besonders groß, nicht besonders klein, nicht besonders hell. Ihr Durchmesser von 1,4 Millionen Kilometern entspricht ungefähr dem 110-fachen Durchmesser unserer Erde. Sie besteht zum größten Teil aus Wasserstoff und Helium, mit einer Masse von 330.000 Erdmassen oder 100 Jupitermassen. Bis heute hat sie ungefähr die Hälfte ihrer Lebenszeit hinter sich gebracht. Über das Ende unserer Sonne müssen wir uns also in nächster Zeit zum Glück noch keine Gedanken machen. Doch wer denkt, dass wir deshalb keinen weiteren Gedanken an die Sonne verschwenden müssen, irrt sich: Sie hat nämlich andere, sehr wichtige Einflüsse auf uns, die uns dazu veranlassen, unsere Sonne im Detail verstehen zu wollen.

1.1 Die Sonne hat viele Erscheinungsformen

Das komplexe Verhalten unserer Sonne zeigt sich uns mit bloßem Auge selten. Wenn wir mit bloßem Auge gen Sonne blicken, dann sehen wir eine helle, homogene Kreisscheibe am Himmel (siehe Abb. 1a). Haben wir ein Teleskop mit Sonnenfilter, ohne das man niemals direkt in die Sonne blicken sollte, zur Hand, dann können wir manchmal sehen, dass die Oberfläche in Wahrheit nicht frei von Struktur ist, sondern sich Flecken darauf befinden, die sich Sonnenflecken nennen (siehe Abb. 1b). Wenn wir dann noch einen Rotfilter für unser Teleskop zur Verfügung haben, dann können wir noch andere Strukturen auf und am Rand der Scheibe erkennen (siehe Abb. 1c). Haben wir jetzt zusätzlich noch die Möglichkeit, diese Strukturen über längere Zeit zu beobachten, dann werden wir bemerken, dass sie sich bewegen, verändern oder verschwinden können.

Die Sonne ist also deutlich mehr als eine homogene Kugel. Sie zeigt prägnante Strukturen auf ihrer Oberfläche, die sich dynamisch verändern können. Und die-

se Strukturen, die wir im sichtbaren Licht erkennen können, sind noch lange nicht alles, was sich auf der Sonne abspielt. In Wahrheit sind sowohl die Oberfläche als auch die Atmosphäre der Sonne sehr aktive, turbulente Orte. Wer schon einmal das Glück hatte, eine totale Sonnenfinsternis mitzuerleben, der konnte vielleicht einen kurzen Blick auf die Sonnenkorona erhaschen, die normalerweise von der hellen Oberfläche der Sonne überstrahlt wird (siehe Abb. 1d). Die sichtbaren langgezogenen Strukturen der Korona geben einen ersten Hinweis darauf, dass der Einfluss der Sonnenaktivität über die eigentliche Atmosphäre hinausgeht: die Heliosphäre, in der die Einflüsse des Sonnenwinds gegenüber interstellaren Einflüssen dominieren, erstreckt sich bis weit über die Bahnen der Planeten hinaus – nämlich drei- bis viermal so weit wie der Abstand zwischen Sonne und Neptun, dem äußersten unserer Planeten.

1.2 Die verschiedenen Schichten der Sonnenatmosphäre

Wieso sieht die Sonne so unterschiedlich aus? Das Plasma auf der Oberfläche und in der Atmosphäre der Sonne kann sehr unterschiedliche Zustände annehmen. Die Temperatur in der Sonnenatmosphäre variiert stark: die Oberfläche, die Photosphäre, ist mit ungefähr 6000 Grad Celsius relativ kalt. Innerhalb der darüberliegenden Chromosphäre, die sich bis zu 6000 Kilometer über der Oberfläche erstreckt, nimmt die Temperatur etwas ab. Doch kurz darauf passiert etwas Unerwartetes: In der Korona, die direkt an die Chromosphäre anschließt und sich bis Millionen von Kilometern ins All erstreckt, steigt die Temperatur plötzlich auf mehrere Millionen Grad Celsius an. Eigentlich würde man erwarten, dass die Temperatur mit zunehmendem Abstand zur Energiequelle, dem Kern der Sonne, abnimmt. Warum die Sonnenkorona nach außen hin heißer, statt mit zunehmendem Abstand zur Oberfläche kälter wird, ist eine wichtige Frage in der aktuellen Forschung. Unabhängig von der Frage, wie diese Temperaturen entstehen, wissen wir, dass sich die Zustände der Atome im Sonnenplasma durch die verschiedenen Temperaturen ändern – Elektronen besetzen bei verschiedenen Temperaturen und Gasdichten andere Schalen in ihrem Atom oder können ihr Atom sogar vollständig verlassen, wodurch sich der Ionisationsgrad des Plasmas verändert. Durch diese Unterschiede emittiert und absorbiert das Gas je nach Zustand unterschiedliche Strahlung. Zusätzlich wird die ausgesendete Strahlung durch den momentanen Bewegungszustand des Plasmas verändert. Ist die Atmosphäre sehr dynamisch, hat das Einfluss auf die Breite und die Wellenlänge der Spektrallinien. Genauso kann die Anwesenheit eines magnetischen Feldes die ausgesandte Strahlung beeinflussen. Auf diese Weise können Beobachter aus dem gemessenen Sonnenlicht in verschiedenen Wellenlängen Rückschlüsse auf die physikalischen Bedingungen in der Sonnenatmosphäre ziehen – doch dazu später mehr.

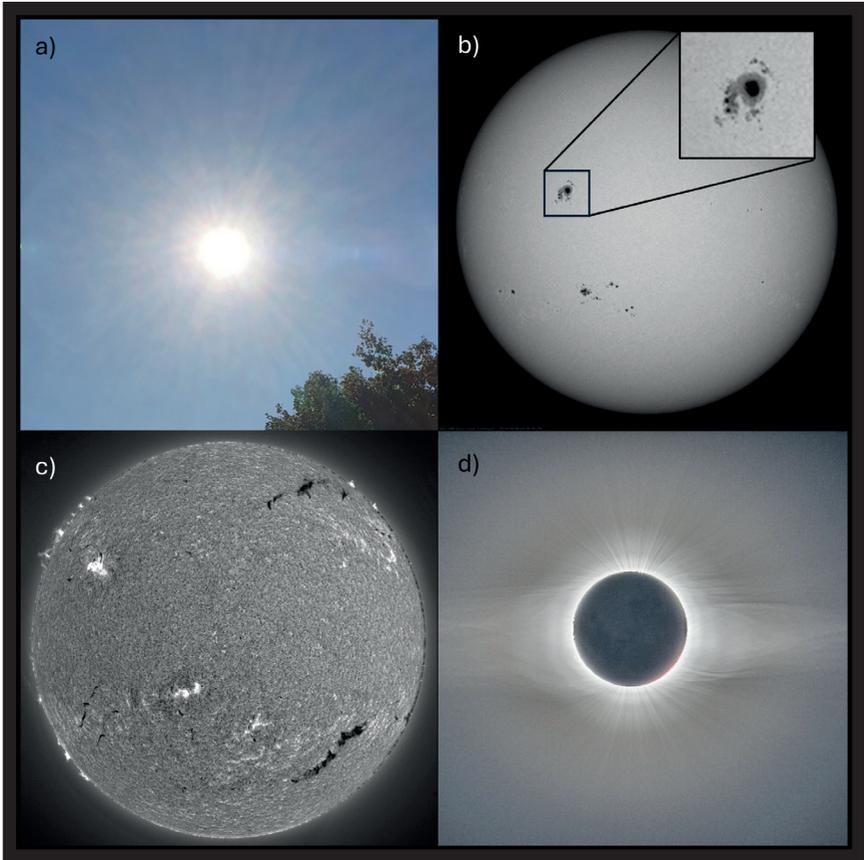


Abbildung 1: Die Sonne in verschiedenen Wellenlängen, aufgenommen mit verschiedenen Instrumenten. a) Mit bloßem Auge; Quelle: Lisa-Marie Zessner. b) Weißlicht-Aufnahme der Sonne mit einer Kamera des Solar Dynamics Observatory (SDO) im September 2014. Die Sonnenoberfläche erscheint weitestgehend als homogene Scheibe. Die dunklen Strukturen auf der Oberfläche sind Sonnenflecken; Quelle: Solar Dynamics Observatory/NASA (bearbeitet: die Nahaufnahme des Sonnenflecks wurde ergänzt.) c) H α -Aufnahme der Sonne mit dem Big Bear Solar Observatory in Kalifornien. Die H α -Strahlung entsteht durch einen Elektronenübergang im Wasserstoffatom und befindet sich im roten Bereich des sichtbaren Spektrums bei einer Wellenlänge von 656 Nanometern. Sie ist der Grund für die roten Strukturen, die man bei einer Sonnenfinsternis manchmal am Rand der Sonne ausmachen kann. Die Aufnahme zeigt deutlich, dass sich auf der Sonnenoberfläche vielfältige Strukturen befinden, die in Weißlichtaufnahmen (siehe Abb. 1b) nicht sichtbar sind. © BBSO/NJIT d) Aufnahme einer totalen Sonnenfinsternis im Jahr 2019. Der Mond schirmt das Licht der Sonnenscheibe ab, sodass Strukturen in der Sonnenkorona sichtbar werden, die durch das Magnetfeld der Sonne erzeugt werden; Quelle: ESA/CESAR/Observatorio Astrofisico di Torino.

Figure 1: The sun at different wavelengths, observed with different instruments. a) The sun as seen by eye; credit: Lisa-Marie Zessner. b) Observation in white light, made by a camera of the Solar Dynamics Observatory in September 2014. The surface of the sun mostly appears as a ho-

mogeneous disk. The dark structures on the surface are called sunspots; credit: adapted from Solar Dynamics Observatory/NASA (the zoom into the sunspot was added). c) H α -observation of the solar disk, taken by the Big Bear Solar Observatory in California. The H α -emission is created by an electron transition in the hydrogen atom which is located in the visible spectrum at 656 nanometers. This radiation is the reason for the red structures that are visible during a solar eclipse at the edge of the solar disk. The observation clearly shows that there is a variety of structures on the solar surface that are not visible in the white light observation (see fig. 1b). © BBSO/NJIT d) Observation of a total eclipse in 2019. The moon obscures the light of the solar disk. As a consequence, structures in the solar corona become visible. These structures are a result of the solar magnetic field; credit: ESA/CESAR/Observatorio Astrofisico di Torino.

Abbildung 2 zeigt, wie Beobachtungen in verschiedenen Wellenlängen die verschiedenen Schichten der Sonnenatmosphäre sichtbar machen. Abbildung 2a) zeigt die Sonnenoberfläche, die Photosphäre. Die sichtbare Struktur nennt man Granulation und wird durch die Konvektion erzeugt, die in dem darunterliegenden Plasma stattfindet. Um dieses Phänomen zu verstehen, müssen wir auch die tieferliegenden Schichten der Sonne berücksichtigen. Im Innern der Sonne wird die durch Kernfusion erzeugte Energie durch unterschiedliche Prozesse nach außen geleitet: Während dies in der Nähe des Kerns durch Strahlungstransport geschieht, dominiert unter der Oberfläche die Konvektion. Wie in einem Kochtopf wird Plasma im Innern der Sonne erhitzt und steigt dann in Blasen an die Oberfläche. Dort kann die Wärme als Strahlung entweichen und kühlt das Plasma auf diese Weise ab. Das abgekühlte Plasma fließt dann wieder nach unten, wo es erneut erhitzt wird und der Prozess von Neuem beginnt. Die hellen Bereiche in Abbildung 2a) zeigen die heißen Zentren der Konvektionszellen. Die dunklen, netzwerkartigen Strukturen entsprechen dem kalten, absinkenden Gas. Die Oberfläche strahlt für uns sichtbares Licht aus: Die Abbildung wurde bei 789 Nanometern aufgenommen. Die Chromosphäre, die direkt über der Photosphäre liegt, ist in Abbildung 2b) zu sehen. Über dem Granulationsmuster in der Photosphäre schließt sich direkt die komplexe und sehr dynamische Feinstruktur der Chromosphäre an. Häufig beinhaltet diese feine, nadelförmige Strukturen, die die Oberfläche wie Haare bedecken. In diesen sogenannten Spikulen wird dichteres Gas der Chromosphäre nach oben geschossen. Die genaue Dynamik der Chromosphäre ist stark abhängig von der lokalen Konfiguration des magnetischen Feldes, da das Plasma permanent mit dem Magnetfeld interagiert. Um herauszufinden, warum die darüberliegende Korona so unerwartet heiß ist, ist es wichtig, die Prozesse in der Chromosphäre zu verstehen, durch die Energie und Masse von der Oberfläche in die Korona transportiert werden können.

Die Struktur der Korona ist in Abbildung 2c) zu sehen. Die gezeigte Strahlung mit einer Wellenlänge von 17,1 Nanometern wird von Gas mit einer Temperatur von ungefähr einer Million Grad Celsius emittiert. Zu sehen sind heiße Magnetbögen, die die komplette Korona durchziehen und die Bewegungsrichtung des Plasmas vorgeben. Da mit zunehmendem Abstand zur Oberfläche das Sonnenplasma immer dünner wird, verändert sich der Einfluss des Magnetfeldes auf

das Plasma in den verschiedenen Schichten. In der Photosphäre ist das Gas noch dicht genug, um das Magnetfeld mit seiner Bewegung mitzuziehen. Mit sinkender Dichte lässt die Dominanz des Plasmas über das Magnetfeld nach, bis in der Korona das Magnetfeld die Bewegung des Plasmas vorgibt – dies führt zu den sehr unterschiedlich aussehenden Schichten der Sonne, die für uns in verschiedenen Wellenlängen des Sonnenlichts sichtbar werden.

1.3 Die magnetische Aktivität der Sonne und ihre Auswirkungen auf das Weltraumwetter

Das Magnetfeld der Sonne spielt für das Verhalten des Plasmas generell eine wichtige Rolle. Die magnetische Aktivität der Sonne folgt einem Zyklus von etwa

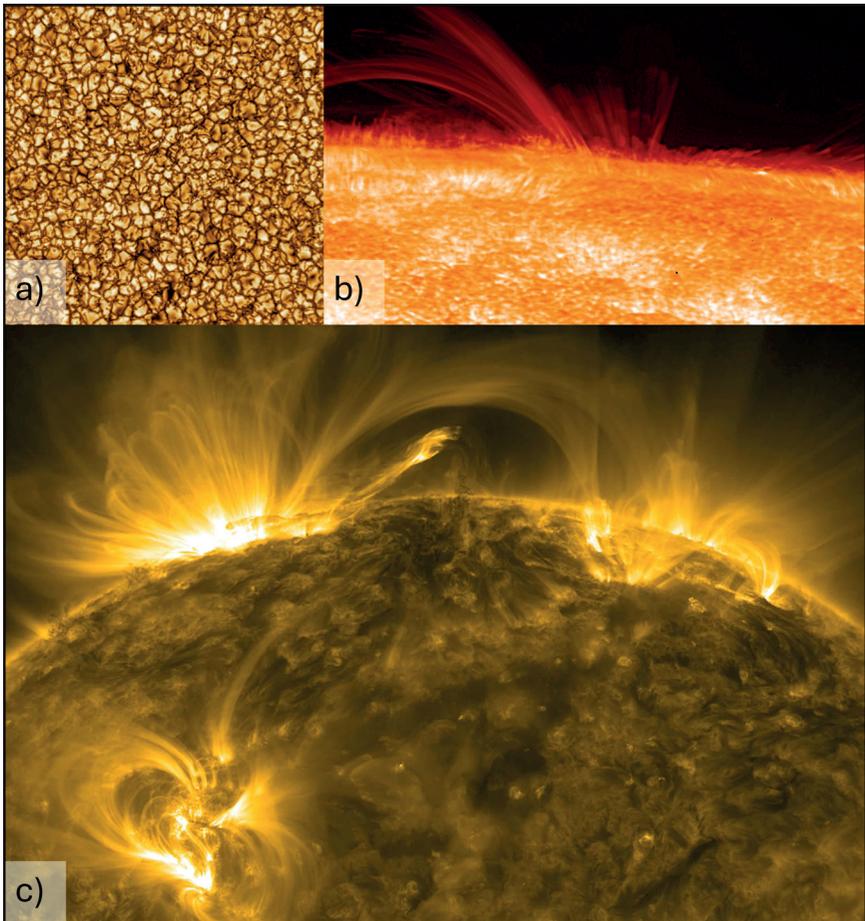


Abbildung 2: a) Ein Ausschnitt der Sonnenoberfläche, aufgenommen mit dem Daniel K. Inouye Solar Telescope in Hawaii. Die Strahlung mit einer Wellenlänge von 789 Nanometern zeigt die Granulationsmuster in der Photosphäre der Sonne, die durch Konvektion des darunterliegenden Gases zustande kommen; Quelle: NSO/NSF/AURA. b) Ein Bild der Chromosphäre, aufgenommen mit dem Hinode Solar Observatory. Es zeigt die Feinstrukturen, die sich über den Konvektionszellen in 2a) bilden. Diese Strukturen sind sehr dynamisch und entstehen durch Wechselwirkung des Plasmas mit dem magnetischen Feld; Quelle: Hinode JAXA/NASA/PPARC. c) Die Sonnenatmosphäre, aufgenommen in einer Wellenlänge von 17,1 Nanometern mit der Atmospheric Imaging Assembly (AIA) an Bord des Solar Dynamics Observatory der NASA. Zu sehen ist Millionen Grad heißes Plasma, das sich entlang der magnetischen Bögen in der Atmosphäre bewegt und so die Struktur des Magnetfelds teilweise sichtbar macht; Quelle: NASA/SDO/AIA.

Figure 2: a) Section of the solar surface taken by the Daniel K. Inouye Solar Telescope in Hawaii. The radiation at a wavelength of 789 nanometers shows the granulation pattern of the solar photosphere which is a result of the underlying convection; credit: NSO/NSF/AURA. b) Image of the chromosphere, taken by the Hinode Solar Observatory. It shows the structures that form above the convection cells in 2a). These structures are highly dynamic and are formed through interaction between the plasma and the magnetic field; credit: Hinode JAXA/NASA/PPARC. c) The solar atmosphere observed at a wavelength of 17.1 nanometers, imaged by the atmospheric imaging assembly (AIA) on board of the NASA Solar Dynamics Observatory. Visible is hot plasma with a temperature of a million degrees, which moves along the magnetic loops in the solar atmosphere and thereby partly resembles the structure of the magnetic field; credit: NASA/SDO/AIA.

elf Jahren. Innerhalb dieser Zeit verändert sich das Verhalten der Sonne drastisch, was Auswirkungen auf die Planeten in unserem Sonnensystem hat. In den aktiven Phasen der Sonne ist die Wahrscheinlichkeit, dass uns starke Sonnenstürme erreichen, wesentlich höher. Dass wir uns im Moment in einem Sonnenmaximum befinden, wurde zum Beispiel deutlich, als Polarlichter im Mai dieses Jahres auch in niedrigeren Breitengraden zu sehen waren – ein seltenes Ereignis, zumal sich die sogenannten Nordlichter (siehe Abb. 3a) ihrem Namen nach doch normalerweise auf höhere Breitengrade beschränken.

Wie entstehen diese Sonnenstürme, über die in letzter Zeit so viel berichtet wurde? Wenn magnetische Strukturen auf der Sonne sich dynamisch verändern, dann kann es passieren, dass diese instabil werden und ausbrechen. Dabei kann es zu starker Emission von Strahlung, sogenannten Flares, und koronalen Massenauswürfen kommen. Bei diesen Auswürfen werden geladene Teilchen des Sonnenplasmas und magnetische Felder ins All geschleudert. Ein Beispiel, wie diese Plasmaauswürfe aussehen können, ist in Abbildung 3b) und 3c) gezeigt. Wenn diese koronalen Massenauswürfe auf die Erde treffen, interagieren sie mit den Molekülen der Erdatmosphäre, wodurch es zum Beispiel zu buntleuchtenden Nordlichtern kommt. Diese sind allerdings nicht der einzige Effekt der Sonnenaktivität, den wir auf der Erde spüren. Normalerweise schützt uns das Magnetfeld der Erde vor dem Einfluss schädlicher Strahlung aus dem Weltall, da geladene Teilchen durch das Erdmagnetfeld an der Erde vorbeigeleitet werden. Wenn ein Sonnensturm aber stark genug ist, können geladene Teilchen tiefer in das Magnetfeld und die Atmosphäre der Erde eindringen. Dies kann gefährliche Einflüsse

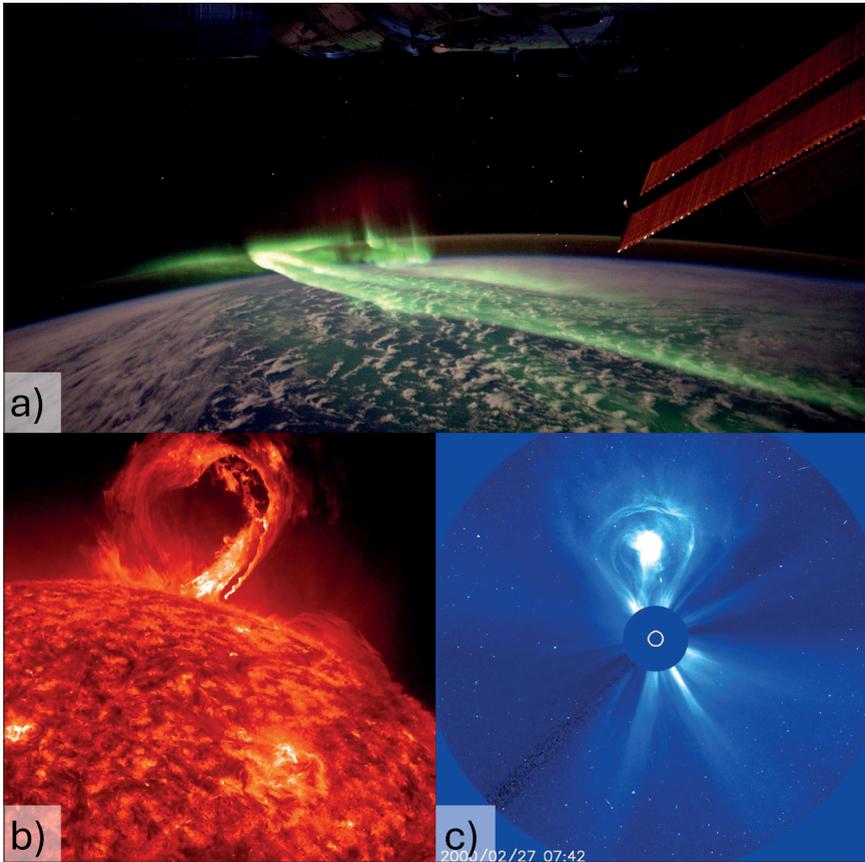


Abbildung 3: a) Polarlichter aus der Sicht der internationalen Raumstation ISS. Die bunten Lichter in der Erdatmosphäre sind nur einer von vielen Effekten, die auftreten können, wenn Sonnenstürme auf die Erde treffen; Quelle: ESA/NASA. b) Koronaler Massenauswurf, gemessen in einer Wellenlänge von 30,4 Nanometern mit AIA an Bord des Solar Dynamics Observatory. Diese Wellenlänge macht chromosphärisches Gas sichtbar, das bei der Eruption durch die Korona hindurch nach oben beschleunigt wird. Normalerweise wird ein Teil dieses Gases von der Sonne weg in die Heliosphäre geschleudert, während der restliche Teil auf die Sonnenoberfläche zurückfällt; Quelle: NASA/SDO/AIA. c) Koronaler Massenauswurf, aufgenommen mit dem LASCO Koronographen (BRUECKNER et al. 1995) an Bord des Solar and Heliospheric Observatory (SOHO). Bei einem Koronographen wird die Sonnenscheibe künstlich verdeckt, sodass das schwache Licht der Sonnenkorona aufgenommen werden kann. Der weiße Kreis in der Mitte des Bildes zeigt die Größe der Sonne unter der Verdeckung. Mit Koronographen kann die Bewegung koronaler Massenauswürfe nach dem Verlassen der Sonne untersucht werden. Der LASCO Koronograph kann Bereiche aufnehmen, die bis zu 32 Sonnenradien von der Sonnenoberfläche entfernt sind; Quelle: SOHO/LASCO (ESA & NASA).

Abbildung 3: a) Polar lights as seen from the International Space Station ISS. The colourful lights in the Earth's atmosphere are only one possible effect that can occur when a solar storm hits Earth; credit ESA/NASA. b) Coronal mass ejection observed at a wavelength of 30.4 nm, imaged by the AIA instrument onboard the Solar Dynamics Observatory. This wavelength visualizes

chromospheric gas that is accelerated upwards through the corona during the eruption. Typically, a fraction of this gas is ejected into the heliosphere while the rest falls back onto the solar surface; credit: NASA/SDO/AIA. C) A coronal mass ejection observed by the Lasco coronagraph (BRUECKNER et al. 1995) on board the Solar and Heliospheric Observatory (SOHO). A coronagraph artificially obscures the disk of the sun in order to observe the faint structures in the corona. The white circle in the center indicates the size of the sun below the cover. Coronagraphs are used to observe the motion of coronal mass ejections after they escape from the sun. The Lasco coronagraph can observe regions that are up to 32 solar radii away from the solar surface; credit: SOHO/LASCO (ESA & NASA).

auf unsere technische Infrastruktur haben. Die Instrumente und Solarpanels von Satelliten können beschädigt werden, was zu Störungen oder Ausfällen in Telekommunikation und GPS-Verbindungen führen kann. Eine starke Strahlungsbelastung während des Sturms erhöht außerdem die Gesundheitsrisiken für Astronautinnen und Astronauten auf der internale Raumstation ISS, vor allem wenn diese sich außerhalb der Raumstation befinden. In sehr starken Fällen kann auch unsere Stromversorgung gestört werden – einen großflächigen Stromausfall aufgrund eines Sonnensturms gab es zum Beispiel im März 1989 in Kanada. Auch Raketenstarts können gefährdet sein, da sich während des Sturms die Dichte der Atmosphäre verändert. Im Februar 2022 fielen 38 SpaceX Satelliten während des Raketenstarts aufgrund eines Sonnensturms zur Erde zurück (BERGER et. 2023).

Um uns vor diesen Auswirkungen zu schützen, ist es wichtig, so genau wie möglich vorhersagen zu können, wann ein Sonnensturm die Erde trifft und wie stark dieser Sturm sein wird. Ein wichtiger Bestandteil dazu ist die genaue Analyse der auftretenden koronalen Massenauswürfe, sobald die Eruption auf der Sonne stattgefunden hat. Dafür sind Koronographen sehr hilfreich (siehe Abb. 3c). Normalerweise überstrahlt das Licht der hellen Sonnenscheibe die Strahlung, die von der Atmosphäre ausgesandt wird, sodass Strukturen innerhalb der Atmosphäre nur schwer zu sehen sind. Koronographen beinhalten dagegen eine künstliche Verdeckung der Sonnenscheibe innerhalb des Teleskops, sodass das Licht der Scheibe abgeblockt wird. Dadurch können ausbrechende Strukturen in der Atmosphäre besser sichtbar gemacht und ihre zeitliche Entwicklung aufgenommen werden, während sie sich von der Sonne entfernen. Dies ermöglicht Weltraumwettervorhersagen einige Tage bis Stunden vor dem Eintreffen des Sturms auf der Erde. Für eine langfristige Vorhersage ist dies aber nicht genug. Daher ist es ebenfalls notwendig zu untersuchen, wie aktive magnetischen Strukturen sich auf der Sonne bilden und entwickeln – und dazu ist es wichtig, die Zusammenhänge zwischen allen Schichten der Sonnenatmosphäre zu verstehen.

Die Wahrscheinlichkeit eines starken Sturms ist nicht immer so hoch wie im Moment. Am Anfang eines Sonnenzyklus befindet sich die Sonne in einem Zustand minimaler magnetischer Aktivität: Man sieht wenige bis keine Sonnenflecken auf der Oberfläche und es kommen nur vereinzelt Ausbrüche vor, die geladene Teilchen und magnetische Felder ins All schleudern. Dann nimmt die Aktivität zu, bis sie nach ungefähr fünf bis sechs Jahren das nächste Maximum erreicht.

Es werden magnetische Flussröhren im Inneren der Sonne generiert, die nach oben steigen, bis sie durch die Oberfläche brechen und als Sonnenflecken sichtbar werden. Während der Anstiegsphase sieht man mehr und mehr Sonnenflecken auf der Oberfläche auftauchen, die im Laufe des Zyklus immer näher am Äquator der Sonne auftauchen. Mit diesem Anstieg nimmt die Aktivität der Sonne zu: die Atmosphäre wird dynamischer und es kommt häufiger zu koronalen Massenauswürfen. Um den Aktivitätsverlauf verstehen und voraussagen zu können, ist es wichtig, die Entstehung und Entwicklung des Magnetfelds zu studieren. Es wird angenommen, dass ein Dynamoprozess das Magnetfeld im Innern der Sonne erzeugt, doch wie das genau passiert, wissen wir noch nicht. Auch dies ein wichtiger Bestandteil aktueller Forschung. Insgesamt gibt es einiges, das wir über unsere Sonne noch nicht wissen. Daher beobachten wir sie rund um die Uhr mit erdgebundenen Teleskopen und Satelliten im All. Doch wie funktionieren diese Beobachtungen?

2 Die Sonne beobachten

Die Sonne als Forschungsobjekt steckt voller Herausforderungen. Anders als bei Laborexperimenten, ist jeder Zustand der Sonne und somit jede Beobachtung einzigartig und kann nicht beliebig oft reproduziert werden.

Es gibt mehrere Möglichkeiten die Sonne und ihre Atmosphäre zu untersuchen. Mit Teilchendetektoren, die sich auf Raumsonden befinden, können direkt Größen wie Dichte, Temperatur, Geschwindigkeit und Zusammensetzung des Gases gemessen werden. Das erfordert, dass sich die Sonde zwischen den Partikeln, also zum Beispiel innerhalb des Sonnenwinds, befindet. Um einiges flexibler ist die indirekte Untersuchung des Plasmas durch das abgestrahlte Licht. Dies kann mit Teleskopen auf der Erde oder im All erfolgen. Im Folgenden werden drei Beobachtungsmöglichkeiten erläutert, die in der Sonnenforschung eingesetzt werden. Der Fokus liegt hierbei auf der Messung des Lichtspektrums.

2.1 Das Lichtspektrum

Das Licht der Sonne ist voller Informationen. Mit sogenannten Spektrometern kann das Licht in seine Bestandteile aufgeteilt werden. Dabei enthält das Spektrum einen viel größeren Wellenlängenbereich als die Farben, die wir mit dem bloßen Auge wahrnehmen können. Der größte Teil des Sonnenlichts besteht aus Wärmestrahlung. Das ist die Strahlung, die von jedem Objekt ausgeht, abhängig von dessen Temperatur. Bei der Sonne reicht das Spektrum bis in den ultravioletten und Röntgenstrahlung-Bereich. Bestünde die Sonne nur aus Wasserstoff und Helium, sähe das beobachtbare Spektrum ganz anders aus. Es sind die Elemente in der Atmosphäre der Sonne, die uns eine genauere Erforschung unseres Heimatsterns

überhaupt erst ermöglichen. Der Schlüssel steckt in sogenannten Absorptionslinien. Das sind “Lücken” im Sonnenspektrum (siehe Abb. 4), bei denen zum Beispiel Magnesium- oder Kalziumatome in der Sonnenatmosphäre das Licht einer bestimmten Wellenlänge absorbieren. Dabei beinhaltet die exakte Position und Intensität dieser Absorptionslinien im Spektrum Informationen, die Rückschlüsse auf die Bedingungen in der Sonnenatmosphäre ermöglichen. So können manche Absorptionslinien benutzt werden, um die Temperatur oder Geschwindigkeit des Plasmas in der Sonnenatmosphäre zu bestimmen. Aber auch das Magnetfeld kann durch den sogenannten “Zeeman-Effekt” gemessen werden. Dabei führt das Magnetfeld zu einer Aufspaltung von Spektrallinien, sodass aus einer Linie zwei benachbarte Linien entstehen können. Die Stärke der Aufspaltung lässt auf die Stärke des Magnetfelds entlang der Sichtlinie schließen. Diese Informationen bieten bereits eine wichtige Grundlage für die Erforschung solarer und auch stellarer Phänomene.

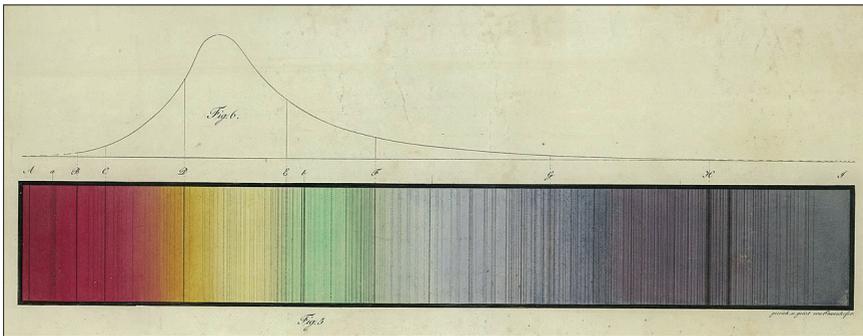


Abbildung 4: Fraunhofer-Linien. Gezeigt ist ein Ausschnitt des sichtbaren Spektrums mit den von Fraunhofer gemessenen Absorptionslinien der Sonne. Auf dieser Grundlage kann auf die chemische Zusammensetzung der Sonne und anderer Sterne geschlossen werden, was den Beginn der astronomischen Spektroskopie kennzeichnet. Die obere Kurve kennzeichnet die Lichtempfindlichkeit des menschlichen Auges.

Figure 4. Fraunhofer lines. Shown is a section of the visible spectrum containing the absorption lines measured by Fraunhofer. This allows to infer the chemical composition of the sun and other stars. This led to the begin of astronomic spectroscopy. The upper curve shows the light sensitivity of the human eye; credit: Joseph Fraunhofer - Deutsches Museum, Archiv, BN 43952 Creative Commons Attribution-Share Alike 4.0 International license.

2.2 Das Licht der Sonne beobachten

Die Absorptionslinien sind, abhängig von den Elementen und der Temperatur in der Atmosphäre, über einen großen Wellenlängenbereich verteilt. Das erschwert die Konstruktion der Messinstrumente erheblich. Auf der einen Seite kann ein Spektrometer immer nur einen bestimmten Wellenlängenbereich aufnehmen. Auf der anderen Seite blockiert die Erdatmosphäre einen Teil der Strahlung des

Spektrums. So wird insbesondere das ultraviolette Licht zum größten Teil durch die Atmosphäre auf dem Weg zur Erdoberfläche absorbiert. Von der Erde aus lassen sich am besten Wellenlängen bei etwa 500 Nanometern (grünes Licht) und Radiowellen mit einer Wellenlänge von Zentimetern bis Metern beobachten.

2.3 Erdgebundene Sonnentelkope

Teleskope auf der Erdoberfläche haben viele Vorteile. Die Teleskope können größer konzipiert werden, da sie nicht mit Hilfe einer Rakete ins Weltall befördert werden müssen. Zudem ist die Wartung einfacher und die Flexibilität bietet Raum für das Testen von Instrumenten. Ein prominentes Beispiel für ein solches Teleskop ist das Swedish Solar Telescope (SST) (siehe Abb. 5a) auf La Palma (SCHARMER et al. 2003), das sich auf einem ca. 2,4 Kilometer hohen Berg befindet. Neben der vielen Vorteile erdgebundener Teleskope ist neben dem limitierten Wellenlängenbereich ein weiterer Faktor nachteilig. Der Brechungsindex von Luft schwankt leicht mit der Dichte und der Temperatur. Da die Atmosphäre ständig in Bewegung ist, führt dies zu kontinuierlichen Verzerrungen in den Aufnahmen. Teleskope, die auf die Sonne ausgerichtet werden, müssen außerdem über Filter und Kühlungsmechanismen verfügen. Ohne diese Vorkehrungen würden die optischen Instrumente durch das gebündelte Sonnenlicht beschädigt werden.

2.4 Weltraumteleskope

Weltraumteleskope haben den Vorteil, dass sie nicht von der Erdatmosphäre und anderen Bedingungen wie Wetter oder Tageszeiten abhängig sind. Da sie in den Weltraum transportiert werden müssen, sind sie aber deutlich teurer. Ein Beispiel wäre der Interface-Region-Imaging-Spectrograph (IRIS) der NASA (DE PONTIEU et al. 2014). Dieser Satellit umkreist die Erde kontinuierlich und beobachtet die Sonne aus dem Orbit, wobei die gemessenen Daten in jedem Orbit an eine Downlink Station auf Spitzbergen gesendet werden. Der Fokus der Mission liegt auf der Erforschung der oberen Chromosphäre und der Übergangsregion zur Korona. Es gibt aber auch Sonden, die sich nicht in einer Erdumlaufbahn befinden. Dies ermöglicht es, die Sonne nicht nur aus kürzerer Distanz, sondern auch aus einem anderen Winkel zu beobachten. Ein Beispiel hierfür ist der 2020 gestartete Solar Orbiter der ESA (MARIRRODRIGA et al. 2021) (siehe Abb. 5b). Auf dem Weg zur Sonne verlässt die Sonde allmählich die Ebene, in der die Erde um die Sonne kreist. Dies ermöglicht die bis dahin ersten Beobachtungen der Sonnenpole. Das ist für die Erforschung der Magnetfelder und des damit verbundenen Sonnenzyklus von großer Bedeutung. Neben den vielen technischen Herausforderungen, die ein Sonnentelkop erfüllen muss, kommt bei Solar Orbiter noch eine weitere Komplikation hinzu. Auf ihrer Reise nähert sich die Sonde auf bis zu etwa 30 Millionen Kilometer an die Sonne an. Das entspricht einem Fünftel des Abstands zwischen

der Erde und der Sonne. Durch die Nähe zur Sonne ist die Sonde einer so großen Strahlung ausgesetzt, dass sie ohne weitere Vorkehrungen einfach verglühen würde. Um dem vorzubeugen, besitzt die Sonde einen Hitzeschild, der die Strahlung der Sonne absorbiert und die innenliegenden Instrumente schützt. Eine besondere Herausforderung an die Ingenieurinnen und Ingenieure waren hierbei die Luken im Hitzeschild, die während einer Messung geöffnet werden, um das Licht für die Messungen durchzulassen.

Die Daten von Solar Orbiter trugen bisher unter anderem wesentlich zum Verständnis der Entstehung von Sonnenwinden bei (CHITTA et al. 2024). Zudem konnten kleinere Strahlungsausbrüche (sogenannte „Lagerfeuer“) mit Solar Orbiter entdeckt werden (BERGHMANS et al. 2021), die ein möglicher Mechanismus zur Heizung der Sonnenkorona sein könnten.

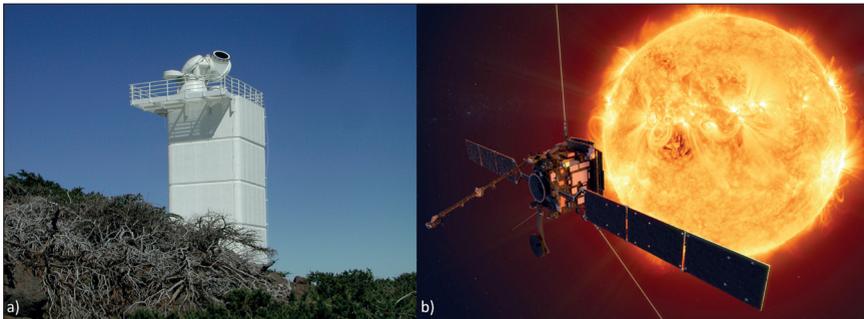


Abbildung 5: a) Das Swedish-Solar-Teleskop auf La Palma, bearbeitet; Quelle: SST, Institute for Solar Physics in the Spanish Observatorio del Roque de los Muchachos of the Instituto de Astrofísica de Canarias, Göran Scharmer. b) Künstlerische Darstellung von der Weltraumsonde Solar Orbiter auf dem Weg zur Sonne, bearbeitet; Quelle: Solar Orbiter: ESA/ATG medialab; Parker Solar Probe: NASA/Johns Hopkins APL.

Figure 5: a) The Swedish-Solar-Telescope on La Palma, edited; credit: SST, Institute for Solar Physics in the Spanish Observatorio del Roque de los Muchachos of the Instituto de Astrofísica de Canarias, Göran Scharmer. b) Artist’s impression of solar orbiter on its way towards the sun, edited; credit: Solar Orbiter: ESA/ATG medialab; Parker Solar Probe: NASA/Johns Hopkins APL.

2.5 Der Kompromiss: ein ballongetragenes Teleskop

Die oben genannten Teleskoparten haben Vor- und Nachteile. Wo die erdgebundenen Teleskope durch den eingeschränkten Wellenlängenbereich und Verzerrungen durch die Atmosphäre benachteiligt werden, sind es bei den Sonden im All oft die komplizierte Technik und die hohen Kosten. Ein Kompromiss liegt zwischen den beiden Extremen. Das Sonnenobservatorium Sunrise (SOLANKI et al. 2010; SOLANKI et al. 2017), ein Projekt des Max-Planck-Instituts für Sonnensystemforschung, wird von einem Heliumballon getragen, der bis zu 35 km über der Erdoberfläche in die Stratosphäre aufsteigt. Die Besonderheit liegt darin, dass der

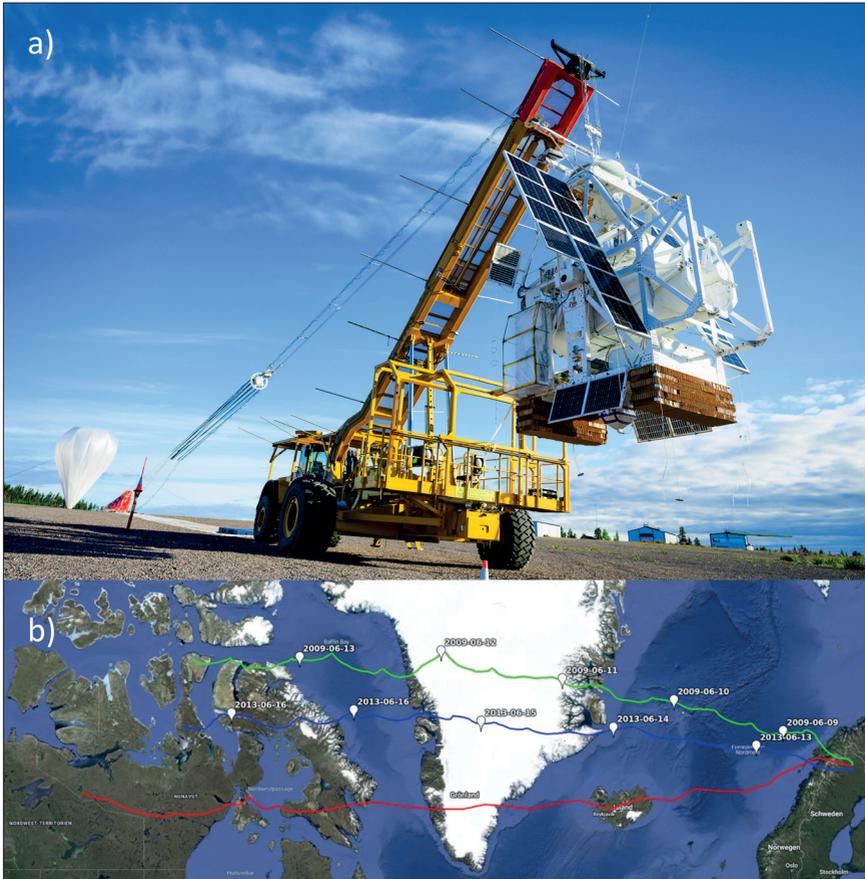


Abbildung 6: a) Das Sunrise III Teleskop. Zu sehen ist die Gondel mit der Teleskopaufhängung in der Mitte an einem Kran. Im Hintergrund ist der Ballon zu sehen, der gerade mit Helium befüllt wird. Bearbeitet. Quelle: SSC/Mattias Forsberg. b) Flugrouten von Sunrise I - III. Diese befinden sich in der Nähe der Polarregion, sodass das Teleskop während des Fluges im Sommer 24 Stunden am Tag mit Licht versorgt wird, bearbeitet; Quelle: MPS/Sunrise III (erstellt mit Google Maps).

Figure 6: a) Sunrise III Teleskop. Shown is the gondola with the telescope mounting in the center. In the background, the balloon is visible which is being filled with helium; credit: SSC/Mattias Forsberg. b) flight trajectory of Sunrise I - III. The route of Sunrise III is close to the polar region to ensure that the instruments can observe the sun 24 hours per day; credit: MPS/Sunrise III (created with Google Maps).

Großteil der Erdatmosphäre sich somit unterhalb des Observatoriums befindet. Gleichzeitig ist der Spiegel des Teleskops größer als bei jedem Sonnenteleskop im Weltraum. Somit werden die Vorteile kombiniert und die Kosten sind zusätzlich signifikant niedriger als bei einem Weltraumteleskop, da unter anderem kein

Raketenstart notwendig ist. Das Teleskop befindet sich in einer Gondel (Abb. 6a) die an einem Heliumballon befestigt in Schweden gestartet wird. Von da an wird das Teleskop von stratosphärischen Winden getragen und fliegt etwa fünf bis sieben Tage, bevor es im Norden Kanadas kontrolliert niedergeht (Abb. 6b). Während dieser Zeit kann das Teleskop 24 Stunden am Tag die Sonne beobachten. Danach wird der Ballon abgetrennt und die Gondel fliegt, abgesichert durch einen Fallschirm, zurück auf die Erdoberfläche. Nach einer glücklichen Landung können alle Bestandteile, insbesondere der Spiegel des Teleskopes, wiederverwendet werden, wodurch weitere Kosten gespart werden. Die ersten beiden Flüge von Sunrise (2009 und 2013) lieferten hochaufgelöste Aufnahmen der Sonnenatmosphäre, die wesentlich zum Verständnis der solaren Magnetfelder und die Aufheizung der Sonnenatmosphäre beigetragen haben. Im Juli 2024 fand ein dritter Flug von Sunrise statt, bei dem sehr vielversprechende Daten aufgenommen wurden, unter anderem von mehreren Sonnenflecken und einem Flare. Das Team stellte sogar einen Rekord für die längste durchgängige Beobachtung mit der bisher höchsten Auflösung auf, die mehr als vier Stunden dauerte.

3 Beobachtungen interpretieren mit Hilfe von Simulationen

Nach all diesen Details kann man vor allem eines sagen: Die vielfältigen Prozesse auf der Sonne zu beobachten ist schwierig; die gewonnenen Daten dann physikalisch genau zu interpretieren sogar noch schwieriger. Sehr viele verschiedene Mechanismen beeinflussen die Strahlung, die unsere Instrumente messen können. Oft kann man aus Beobachtungen nicht eindeutig ableiten, welche physikalischen Eigenschaften das vermessene Sonnenplasma genau hat. Eine weitere Hilfe, um genauere Aussagen treffen zu können, bieten theoretische Modelle und Simulationen. Diese Modelle enthalten Annahmen über die Physik, die als relevant für die Zustände in der Sonnenatmosphäre eingeschätzt werden. Dabei können Parameter variiert und die Ergebnisse verglichen werden – sehen wir bei einem Ergebnis Ähnlichkeiten mit den Beobachtungen auf der Sonne, können wir analysieren, welche physikalischen Mechanismen und Parameter in der Simulation zu diesem Ergebnis geführt haben. Anders als bei Beobachtungen liefern Simulationen direkt die grundlegenden physikalischen Größen, die den Zustand des Sonnenplasmas beschreiben. Um Simulationsergebnisse mit Beobachtungen zu vergleichen, können synthetische Beobachtungen berechnet werden. Ein Beispiel dafür ist in Abbildung 7 zu sehen. Sie zeigt eine Simulation, die einen Ausschnitt der Sonnenoberfläche zeigt. Abbildung 7a) und b) veranschaulichen das magnetische Feld in verschiedenen Höhen der Atmosphäre, wie es auch in Beobachtungen der Sonnenscheibe gemessen werden kann. Abbildung 7c) und d) zeigen die synthetisch berechnete Strahlung der H α -Linie des Wasserstoffatoms, die verwendet wird, um Strukturen in der Chromosphäre zu untersuchen, wie sie

in Abbildung 1c) zu sehen sind. Diese simulierte Strahlung kann mit Beobachtungen der Sonne verglichen werden, die eine ähnliche magnetische Struktur wie die Simulation aufweisen. Das erlaubt Rückschlüsse darauf, welche der theoretisch berücksichtigten physikalischen Mechanismen auf der Sonne eine Rolle spielen. Ein weiterer Vorteil von Simulationen ist, dass sie die Sonne auf Skalen modellieren können, die kleiner als die momentan mögliche Auflösung in Beobachtungen ist. Damit kann konzeptionell untersucht werden, welche physikalischen Mechanismen auch auf kleineren Skalen für die Dynamik und Struktur der Atmosphäre eine Rolle spielen.

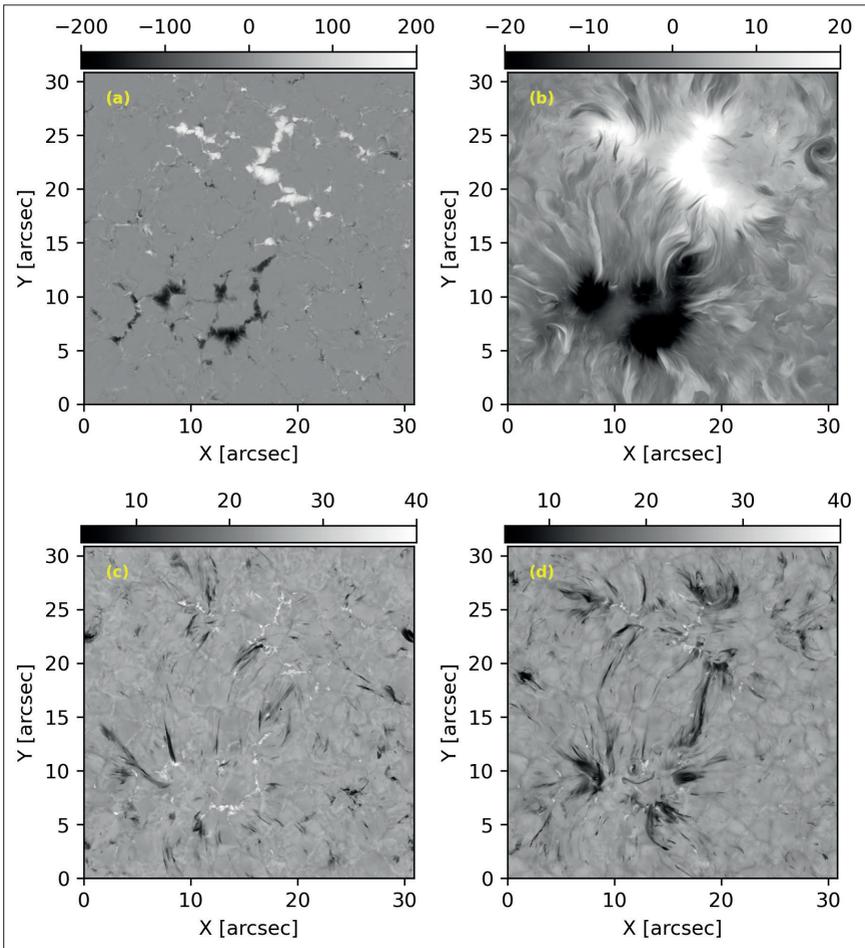


Abbildung 7: Ergebnisse einer Simulation der Sonnenatmosphäre mit dem Simulationscode MURaM (VÖGLER et al. 2005; REMPEL 2016; PRZYBYLSKI et al. 2022). Die Simulationsbox hat eine Breite und Länge von 24.000 km, was einem Siebzigstel des Sonnendurchmessers entspricht. Damit können kleinskalige Prozesse untersucht werden, die für die Dynamik der Atmosphäre essenziell sind. Der Blick ist hier direkt auf die Sonnenoberfläche gerichtet. Die Dimension der Achsen ist in Bogensekunden angegeben. Das ist eine gängige Einheit für den Öffnungswinkel der Kamera bei Weltraumbeobachtungen und entspricht einem 3600stel eines Grads. a) Struktur des magnetischen Feldes auf der Oberfläche der simulierten Sonne. b) Struktur des magnetischen Feldes bei einer Höhe von 1000 km über der Sonnenoberfläche. c) und d) simulierte Strahlung der H α -Linie des Wasserstoffs in zwei verschiedenen Wellenlängen, die Teil der Linie sind. Abbildung c) zeigt Strukturen, die sich in diesem Moment vom Beobachter wegbewegen, während Abbildung d) das Plasma zeigt, das sich auf den Beobachter zubewegt. Die schwarzen Strukturen zeigen Teile der Chromosphäre, die für den Energietransport von der Photosphäre in die Korona sehr bedeutsam ist. Unter diesen langgezogenen Strukturen ist das Granulationsmuster der Photosphäre, das in Abbildung 2a) zu sehen ist, noch teilweise sichtbar. Die sichtbaren Strukturen können mit Beobachtungen in der gleichen Wellenlänge verglichen und daraus Rückschlüsse auf den Zustand des Plasmas in Beobachtungen gezogen werden (eine Beobachtung der kompletten Sonnenscheibe im H α -Übergang ist zum Beispiel in Abbildung 1c) zu sehen); Quelle: MPS/Sanghita Chandra.

Figure 7: Results from a simulation of the solar atmosphere with the MURaM code (VÖGLER et al. 2005; REMPEL 2016; PRZYBYLSKI et al. 2022). The simulation box has a side length of 24,000 km in each direction, which corresponds to 1/70 of the solar radius. This allows to simulate small-scale processes that are essential for the dynamics of the solar atmosphere. The unit of the axes is measured in arcseconds. This is a common unit for the aperture angle of the camera in space observations. One arcsecond is equivalent to 1/3,600 of one degree. a) Structure of the magnetic field at the surface of the simulated sun. b) Structure of the magnetic field at an altitude of 1,000 km above the solar surface. c) and d) simulated H α -emission at two different wavelengths, that are part of the H α -line. Panel c) shows structures which move away from the observer, while panel d) shows structures moving towards the observer. The dark structures show parts of the chromosphere. This layer of the solar atmosphere is important for the energy transport from the photosphere into the corona. Below these elongated structures one can see the granulation pattern of the photosphere, which is also visible in Figure 2a). The visible structures can be compared with observations at the same wavelength to study physical conditions of the observation. An observation of the whole solar disk in H α -light can be seen in Figure 1c); credit: MPS/Sanghita Chandra.

4 Ausblick

In den letzten Jahrzehnten sind die Möglichkeiten, die Sonne zu erforschen, immer besser geworden. Stärkere Computerleistung erlaubt es uns nicht nur, mehr Messdaten aufzunehmen und zu verarbeiten. Durch sie können wir auch immer kompliziertere theoretische Simulationen durchführen, um die Physik der Sonne besser zu verstehen. Trotz immenser Fortschritte bleiben dennoch viele fundamentale Fragen unbeantwortet. Welche Mechanismen sorgen dafür, dass die Sonnenkorona so stark aufgeheizt wird? Es gibt verschiedene Theorien, die Antwortmöglichkeiten bieten, doch in vielen Fällen handelt es sich dabei um vergleichsweise kleinskalige Prozesse. Um ihre Plausibilität zu überprüfen, brauchen wir daher in Zukunft noch hochauflösendere Messungen. Diese könnten zum Beispiel von der gerade durchgeführten Sunrise III Mission kommen. Eine

weitere wichtige Frage dreht sich darum, wie das Magnetfeld der Sonne entsteht und aufrechterhalten wird. Dabei sind die Messungen von Solar Orbiter hilfreich – vor allem, sobald der Satellit nächstes Jahr anfangen wird, sich aus der Ekliptik herauszubewegen, um zum allerersten Mal die Pole der Sonne zu untersuchen. Die Ekliptik beschreibt dabei die Ebene, in der sich die Sonne und die Planeten bewegen. Generell ist unser Verständnis des solaren Dynamos auch sehr wichtig, um Eruptionen und Sonnenstürme vorherzusagen, die durch die magnetische Aktivität unserer Sonne erzeugt werden. Um die Vorhersage des Weltraumwetters zu verbessern, wird unter anderem die zurzeit in Planung befindliche ESA-Mission Vigil helfen: Dieser Satellit wird 2031 zum fünften Lagrange-Punkt fliegen – einem Punkt auf der Umlaufbahn der Erde um die Sonne, der stets etwa 150 Millionen Kilometer hinter der Erde liegt. Dadurch wird es uns möglich sein, aktive magnetische Regionen auf der Sonne zu untersuchen, bevor sie von der Erde aus sichtbar werden.

Dies sind nur ein paar der Missionen, die uns in Zukunft andere und bessere Einblicke in die Vorgänge unserer Sonne gewähren werden. Wir können uns also auch weiterhin auf neue und faszinierende Erkenntnisse über unseren Heimatstern freuen.

5 Literatur

- BERGER, T.E., DOMINIQUE, M., LUCAS, G. et al. (2023): The Thermosphere Is a Drag: The 2022 Starlink Incident and the Threat of Geomagnetic Storms to Low Earth Orbit Space Operations. – *Space Weather*, **21** (3): e2022SW003330; doi: 10.1029/2022SW003330.
- BRUECKNER, G.E., HOWARD, R.A., KOOMEN, M.J. et al. (1995): The Large Angle Spectroscopic Coronagraph (LASCO). – *Solar Physics*, **162** (1): 357-402; doi: 10.1007/978-94-009-0191-9_10.
- SCHARMER, G.B., BJELKSJO, K., KORHONEN, T.K. et al. (2003): The 1-m Swedish solar telescope. – *Innovative Telescopes and Instrumentation for Solar Astrophysics*, **4853**: 341-350; doi: 10.1117/12.460377.
- DE PONTIEU, B., TITLE, A.M., LEMEN, J.R. et al. (2014): The Interface Region Imaging Spectrograph (IRIS). – *Solar Physics*, **289** (7): 2733–2779; doi: 10.1007/s11207-014-0485-y.
- MARIRRODRIGA, C.G., PACROS, A., STRANDMOE, S. et al. (2021): Solar Orbiter: Mission and spacecraft design. – *Astron. Astrophys.*, **646** / A121: 1-18; doi: 10.1051/0004-6361/202038519.
- CHITTA, L.P., ZHUKOV, A.N., BERGHMANS, D. et al. (2024): Picoflare jets power the solar wind emerging from a coronal hole on the Sun. – *Science*, **381** (6660): 867-872; doi: 10.1126/science.ade5801.
- BERGHMANS, D., AUCHÈRE, F., LONG D.M. et al. (2021): Extreme-UV quiet Sun brightenings observed by the Solar Orbiter/EUI. – *Astron. Astrophys.*, **656** / L4: 1-11; doi: 10.1051/0004-6361/202140380.
- SOLANKI, S.K., BARTHOL, P., DANILOVIC, S. (2010): Sunrise: Instrument, mission, data, and first results. – *Astrophys. J. Lett.*, **723** (2): L127-L133; doi: 10.1088/2041-8205/723/2/L127.
- SOLANKI, S.K., RIETHMÜLLER, T.L., BARTHOL, P. (2017): The Second Flight of the Sunrise Balloon-borne Solar Observatory: Overview of Instrument Updates, the Flight, the Data, and First Results. – *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, **229** (1): 3-19; doi: 10.3847/1538-4365/229/1/2.

- VÖGLER, A., SHELYAG, S., SCHÜSSLER, M., CATTANEO, F., EMONET, T. & LINDE, T. (2005): Simulations of magneto-convection in the solar photosphere. Equations, methods, and results of the MURaM code. – *Astron. Astrophys.*, Bd. **429**, S. 335–351; doi: 10.1051/0004-6361:20041507.
- REMPEL, M. (2016): Extension of the MURaM radiative MHD code for coronal simulations. – *Astrophys. J.*, **834** (1): 10; doi: 10.3847/1538-4357/834/1/10.
- PRZYBYLSKI, D., CAMERON, R., SOLANKI, S.K. (2022): Chromospheric Extension of the MURaM code. – *Astron. Astrophys.*, **A91**: 1-23; doi.org/10.1051/0004-6361/202141230.

M. SC. LISA-MARIE ZESSNER
zessner@mps.mpg.de

M. SC. PATRICK ONDRATSCHEK
ondratschek@mps.mpg.de

Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung, Göttingen
Justus-von-Liebig-Weg 3
37077 Göttingen
<https://www.mps.mpg.de>

Manuskripteingang: 21. August 2024

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: [Jahrbücher des Nassauischen Vereins für Naturkunde](#)

Jahr/Year: 2024

Band/Volume: [145](#)

Autor(en)/Author(s): Zessner Lisa-Marie, Ondratschek Patrick

Artikel/Article: [Unser Heimatstern, die Sonne – wie wir sie vermessen und verstehen können 233-251](#)