

DER URSPRUNG DES LEBENS:

Die Aktivitäten der Sonne

VON DR. KAI-OLIVER DETKEN, GRASBERG

Die Sonne ist der Zentralstern unseres Sonnensystems und besitzt eine Entfernung von 150 Millionen Kilometern von der Erde, was quasi einer Astronomische Einheit (AE) entspricht. Trotz dieser für unsere Verhältnisse großen Entfernung, hat dieser Stern eine enorme Bedeutung für das Leben auf der Erde und beeinflusst uns auch durch seine unterschiedlichen Aktivitätsphasen. Alleine 99,9% der gesamten Wärme des Erdklimas werden durch die Sonne verursacht und sog. Sonnenwinde sind in der Lage die Erde zu erreichen. Letztendlich beeinflusst uns die Sonne durch ihre Gravitation, die Strahlung, das Magnetfeld und ihre Teilchenemissionen. Dadurch nimmt sie auf das Klima unseres Heimatplaneten erheblichen Einfluss. Aktuell wird gerade diskutiert, welchen Einfluss die Aktivitäten der Sonnenflecken auf das Klima der Erde haben und wann wir wieder ein Maximum erreichen werden wird, da das Minimum sich zeitlich immer weiter verlängerte. In diesem Artikel sollen daher die jeweiligen Sonnenaktivitäten einmal näher beleuchtet werden und wie wir davon abhängen.

Geschichtliches

Die Sonne war den Menschen schon immer heilig bzw. ihrer Wichtigkeit für das Leben auf der Erde war man sich seit langer Zeit bewusst. Besonders als die Menschen mit dem Ackerbau anfangen und den optimalen Zeitpunkt für das Aussäen finden mussten, wurde die Sonne als natürliche Uhr empfunden und verehrt. Im alten Ägypten wurde dem Sonnengott Ra Tribut gezollt, während in Griechenland der Sonnengott Helios mit seinem Sonnenwagen täglich über das Firmament fuhr. Viele weitere Beispiele alter Kulturen wie die Azteken oder die Maya ließen sich hier aufzählen. Allerdings verehrten die Griechen als einzige Kultur die Sonne nicht nur, sondern setzten sich auch wissenschaftlich mit ihr auseinander. Sie betrachteten sie nämlich auch als natürliches Objekt, was der Auffassung der Sonne als Teil einer göttlichen Entität komplett widersprach.

Die Beobachtung der Sonne und die Bestimmung bestimmter Bahnpunkte wie Sommer- und Wintersonnenwende sowie die Tagundnachtgleiche waren eine Voraussetzung für die Erstellung von Kalendern. Dadurch konnte man wichtige jahreszeitliche Ereignisse vorhersagen, wie beispielsweise der günstige Zeitpunkt zum Aussäen der Saat. Alte Kultstätten wie in Stonehenge in England oder



Abb. 1: Newgrange in Irland [1].

Newgrange, Dowth und Knowth in Irland waren anscheinend zu diesen Beobachtungszwecken eingerichtet worden. So ist die Anlage von Stonehenge so ausgerichtet, dass am Morgen des Mittsommertages, wenn die Sonne ihre höchste nördliche Position erreicht, die Sonne direkt über einem Positionstein aufgeht und die Sonnenstrahlen in gerader Linie ins Innere des Bauwerks eindringen. [15] Ähnlich ist dies in Newgrange der Fall (siehe Abbildung 1). An ca. 13 Tagen jedes Jahres dringt um die Wintersonnenwende bei Sonnenaufgang ein Lichtstrahl durch eine Öffnung über dem Eingang für ca. 15 min in

den Gang und in eine der Kammern. Zwar hat sich die Erdachse nach 5.000 Jahren leicht verstellt; trotzdem ist der Effekt auch heute noch etwas schwächer auszumachen. Der Lichtstrahl endet heute daher ein paar Meter vor der Kammer. [16]

Trotz der Verehrung der Sonne stand über 2.000 Jahre im geozentrischen Weltbild die Erde im Mittelpunkt unseres Sonnensystems. Dieses Weltbild wurde von der Kirche stark verteidigt, zudem dies auch den Texten der Bibel entsprach. Verfechter anderer Theorien wurden von der Inquisition verfolgt und teilweise umgebracht. Erst Nikolaus Kopernikus beschrieb in

seinem Werk „De Revolutionibus Orbium Coelestium“ das Heliozentrische Weltbild, gemäß dem sich die Erde um die eigene Achse dreht und, wie die anderen Planeten, um die Sonne bewegt. Die Kirche schenkte diesem Werk zuerst wenig Aufmerksamkeit, da es sich um eine rein mathematische Abhandlung handelte. Erst als andere Wissenschaftler diese Mathematik in ein neues Weltbild umsetzen wollten, wandte die Kirche sich klar dagegen. Auch Galileo Galilei kam zu der Erkenntnis von Kopernikus und bekam es anschließend im streng katholischen Italien mit der Kirche zu tun. Letztendlich setzte sich durch die Entdeckung des Teleskops und di-

hatte sich die Sonne stabilisiert und begann ihre Strahlungsaktivität (He-Brennen). Wenn sie ihre Brennendzeit erreicht hat, wird sie zu einem Roten Riesen anwachsen, der in eine instabile Phase übergeht und anschließend zu einem Weißen Zwerg wird. Dieser wird am Ende seines Lebens von einem planetarischen Nebel umgeben sein (z.B. wie der planetarische Ringnebel M57). Von diesem Zeitpunkt sind wir aber noch lange entfernt.

Im Weltraum würden wir die heutige Sonne als weißen Stern wahrnehmen. Erst durch unsere Erdatmosphäre erhält sie ihr gelbliches Erscheinungsbild. Je länger der Weg ist, den die

Allerdings sind dafür in jedem Fall entsprechende Sonnenfilter (Folie oder beschichtetes Glas mit UV-Sperrfilter) vorzuhalten. Ein direktes Hineinsehen ist für das menschliche Auge nicht zu empfehlen. Ausnahmen können bei starker Bewölkung oder bei Sonnenauf- und -untergängen gemacht werden. Da die Netzhaut des menschlichen Auges keinen Schmerz empfindet, wird man mögliche Sonnenschäden auch erst wahrnehmen, wenn bereits eine Schädigung davongetragen wurde. Bei kleinen Verletzungen kann sich das Auge mit der Zeit wieder regenerieren; bei größeren Verletzungen bleiben Teilbereiche oder gar das ganze Auge blind. Welche Kraft die Sonne hat, durfte ich auch selbst einmal erleben, als ich mein neues Glasfilter für mein SC-Teleskop ausprobieren wollte. Den Sucher hatte ich nicht mit einem Schutz ausgestattet, so dass ich durch indirektes Anpeilen versucht habe, die Sonne im Sucher zu finden (wird auch Okularprojektion genannt). Das heißt, man richtet das Teleskop ungefähr auf die Sonne aus und versucht dann anhand eines Papiers oder der Handfläche, welches man hinter die Optik des Suchers hält, die Sonne indirekt anzupeilen. Das hat auch einigermaßen funktioniert, obwohl es recht mühsam war. Leider hatte ich vergessen, dass dadurch auch eine höhere Hitze im Sucher entsteht, die dafür gesorgt hat, dass mein Fadenzkreuz durchschmolte. Positiverweise gab es nur einen Material- und keinen Augenschaden. Die ersten Sonnenbeobachter, die mit einem Fernrohr auf die Sonne hielten, hatten dieses Wissen leider nicht. Aus diesem Grund trugen einige Forscher wie beispielsweise Galileo Galilei in der Anfangszeit der Teleskope Augenschäden davon.

Wenn alle Filterregeln beachtet worden sind, kann man mittels Teleskop viele Sonnenaktivitäten mitverfolgen. So lassen sich Protuberanzen und Sonnenflecken sichten und manchmal auch Flares ausmachen, wobei ersteres etwas schwieriger ist. Zusätzlich lässt sich auch noch die Korona der Sonne beobachten, was aber nur während einer Sonnenfins-



Abb. 2: Sonnenaufgang in Spanien an der Costa Brava [1].

verser Beobachtungen aber am Ende die Einsicht durch, dass sich die Erde wohl doch um die Sonne dreht und nicht umgekehrt. Inzwischen weiß man, dass unsere Sonne noch nicht einmal eine herausragende Stellung in unserer Galaxie der Milchstraße, geschweige denn in unserem Universum, einnimmt, sondern dass es sich bei ihr um einen durchschnittlichen Gelben Zwerg handelt.

Alter und Erscheinungsbild

Die Sonne entstand vor 4,6 Milliarden Jahren durch den gravitativen Kollaps einer interstellaren Gaswolke. Nach ca. 50 Millionen Jahren

Sonnenstrahlen zum Erdboden durch die Atmosphäre zurücklegen müssen, desto mehr blaues Licht wird dabei herausgefiltert. Eine tief stehende Sonne bei Auf- oder Untergang erscheint uns deswegen rötlich. Mich faszinieren solche Farbenspiele am Horizont, speziell am Meer, immer wieder, so dass eigentlich kein Urlaub ohne ein solches Bild bei mir auskommt. Die Abbildung 2 zeigt ein solches Beispiel anhand eines Sonnenaufgangs um 7 Uhr morgens an der Costa Brava in Spanien aus diesem Jahr.

Mit Teleskopen lassen sich die Aktivitäten der Sonne gut beobachten.

ternis oder mit speziellen Geräten möglich ist. Während man Sonnenflecken und Flares im Weißlicht gut erkennen kann, was durch herkömmliche Filter ermöglicht wird, lassen sich Protuberanzen nur durch sog. H-Alpha-Filter gut beobachten. Solche Filter besitzen einen besonders schmalbandigen Interferenzfilter, der nur das rote Licht des angeregten Wasserstoffs durchlässt. Während früher diese Filterart sehr kostspielig war und teilweise noch heute ist, sind alternativ spezielle Sonnentelkope am Markt verfügbar, die ausschließlich auf Sonnenbeobachtung spezialisiert sind und „nur“ noch dreistellige Summen verschlingen.

Zusammensetzung und Aufbau

Die Sonne setzt sich zu 73,5% aus Wasserstoff und 25% aus Helium zusammen. Der kleine Rest von 1,5% beinhaltet schwere Elemente wie Eisen, Sauer- und Kohlenstoff. Als Kern wird die Fusionszone bezeichnet. Den gesamten Aufbau stellt anschaulich die Abbildung 3 dar.

Innerhalb der Strahlungszone wird die thermische Energie nun durch Diffusion von Strahlung nach außen transportiert. Dieser Transport geschieht sehr langsam, da die Photonen sich immer wieder am Plasma zerstreuen. Der sehr langsame Strahlungstransport hat einen steilen Temperaturgradienten von ca. 15 Millionen Kelvin im Zentrum zur Folge. In der Konvektionszone treibt der Temperaturgradient gewaltige Konvektionsströme an. Die Größe der Konvektionszellen nimmt dabei nach außen stark ab, so dass an der Sonnenoberfläche das Brodeln mit einem Teleskop als Granulation erkannt werden kann. Am oberen Rand der Konvektionszone nimmt auch die Dichte rapide ab, so dass die Photonen nahezu ungehindert nach außen entweichen können. Diese wird als Photosphäre bezeichnet und besitzt eine Dicke von 300 bis 400 km. Diese Schicht gilt als Oberfläche der Sonne, die wir als Quelle der Sonnenstrahlung wahrnehmen. Die Strahlungstemperatur der Sonne beträgt rund 5.800 Kelvin.

Über der Photosphäre erstreckt sich die Chromosphäre, die von der Photosphäre zwar überstrahlt wird, aber bei totalen Sonnenfinsternissen für einige Sekunden als rötliche Leuchterscheinung zu erkennen ist. Die Temperatur nimmt hier auf über 10.000 Kelvin zu. Über der Chromosphäre liegt die Korona. Die innere Korona erstreckt sich – je nach dem aktuellen Fleckenzyklus – um ein bis zwei Sonnenradien nach außen und stellt eine erste Übergangszone zum interplanetaren Raum dar. Durch Sonnenstrahlung, Stoßwellen und andere Wechselwirkungen mechanischer oder magnetischer Art wird die äußerst verdünnte Koronamaterie nun auf Temperaturen von bis zu 2 Millionen Kelvin aufgeheizt. [3]

Aktivität der Sonne: Sonnenflecken

Als Sonnenflecken werden die dunklen Stellen auf der Photosphäre bezeichnet, die kühler sind als ihre Umgebung und daher weniger Licht abstrahlen. Die Anzahl und ihre Größe spiegeln die Aktivität der Sonne wider. Man hat bei den Beobachtungen festgestellt, dass es Minima- und Maxima-Werte gibt, die sich ungefähr alle 11 Jahre wiederholen. Dies wird als Sonnenfleckzyklus bezeichnet und erhielt von Rudolf Wolf ab dem Jahre 1749 eine fortlaufende Nummerierung. Aktuell befinden wir uns daher im 24. Zyklus. Im Minimum kann man teilweise monatelang gar keine Flecken begutachten, während im Maximum in der Vergangenheit bereits schon hunderte wahrgenommen wurden. Dieser Zyklus liegt nicht exakt bei 11 Jahren, sondern variiert zwischen 9 und 14 Jahren. Aktuell haben wir beispielsweise ein Minimum zu verzeichnen gehabt, welches recht lange andauerte. So lange, dass sich mancher Sonnenforscher schon fragte, ob die Sonne überhaupt wieder aktiv werden wird. Inzwischen fängt die Sonne aber langsam wieder an aktiver zu werden, wie an der aktuellen Aufnahme vom 24. April (Abbildung 4 und 5) zu erkennen ist. Auf dieser Aufnahme, die bei einer Belichtung

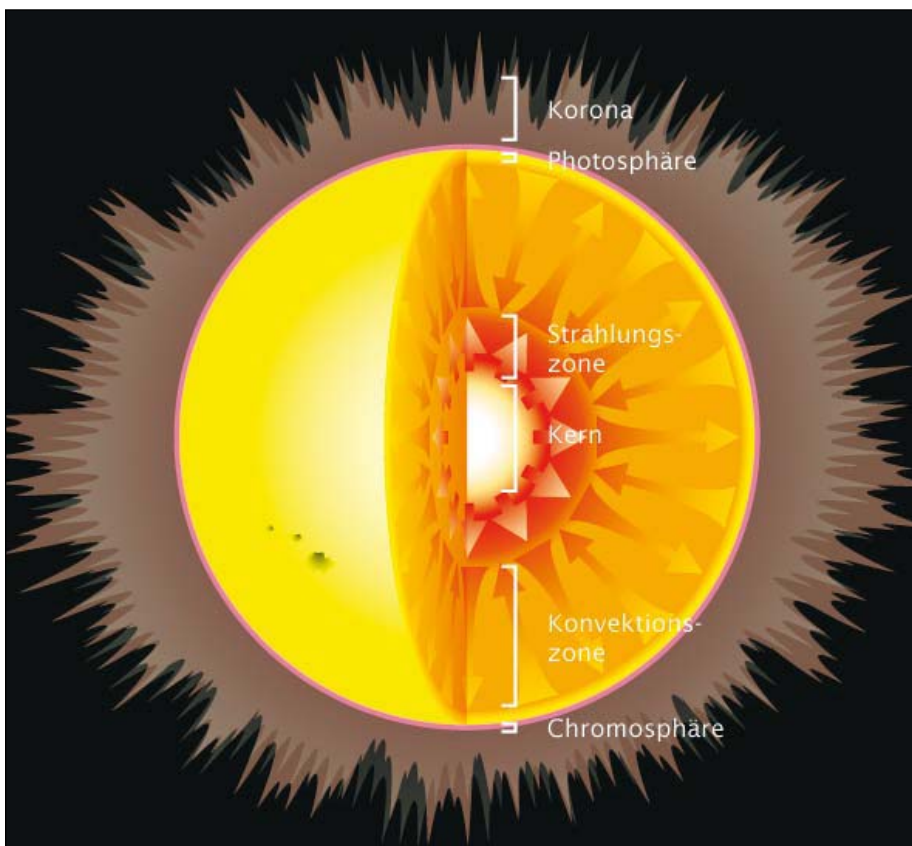


Abb. 3: Architektur der Sonne [2]

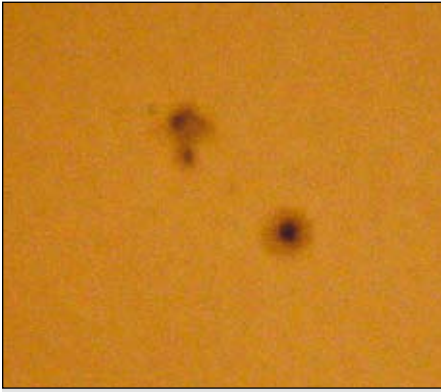


Abb. 4: Sonnenflecken, aufgenommen mit SC-Teleskop LX90 mit Reducer [1].

von 1/4.000 sec entstanden ist, bei einer Brennweite von 1.600 mm (LX90-Teleskop mit Reducer 0,8), werden immerhin drei Fleckengruppen angezeigt (mittig und rechts unten). Das ist mehr als lange Zeit im sichtbaren Licht zu erkennen war.

Da die Sonnenflecken durch starke Magnetfelder hervorgerufen werden, die die Ursache für die Abkühlung sind, besitzt diese Aktivität der Sonne auch Einfluss auf die Erde. Starke Aktivitäten, in denen sich Sonnenflecken miteinander verbinden und sogar Flares entstehen, können auf der Erde zu Störungen elektrischer Anlagen und Satelliten führen. Zusätzlich entwickeln sich dadurch Polarlichter, da sie durch das Auftreffen geladener Teilchen des Sonnenwindes auf den Schutzmantel der Erde entstehen. Sie sind besonders in den Polargebieten der Erde stark anzutreffen, da die auftreffenden Teilchen durch die Feldlinien zu den jeweiligen Polen gelenkt werden. Auf der anderen Seite hat aber auch ein Minimum auf die Erde Einfluss, da die Sonneneinstrahlung sich dann um 1 Promille verringert und dadurch das Klima sich merklich abkühlt. So hatte das sog. Maunderminimum zwischen den Jahren 1645 und 1715 zur Folge, dass sich eine kleine Eiszeit ausbildete. Das heißt, in dieser Zeit wurden keine Sonnenflecken gesichtet und die Winter verlängerten sich, während die Sommer entsprechend kühler wurden. Aufgrund des aktuell sehr langen Minimums hatten die Wissenschaftler Sorge, dass uns vielleicht erneut eine solche Periode

bevorstehen würde. Das scheint durch die aktuellen Sonnenflecken nun aber nicht mehr der Fall zu sein, wie auch die hier abgebildeten Aufnahmen in Abbildung 4 und 5 beweisen. [17]

Der Tiefpunkt der Sonnenaktivitäten wurde im Herbst 2008 erreicht. Gemäß der Schätzung des amerikanischen Wetterdiensts National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) wird das Maximum im Mai 2013 erreicht werden, wobei erwartet wird, dass sich die Intensität mit einer maximalen Sonnenfleckenrelativzahl von 90 deutlich unter dem Durchschnitt der vorhergehenden Sonnenmaxima halten wird. [4]

Neben dem Sonnenzyklus gibt es auch eine Klassifizierung der Sonnenflecken, die durch Max Waldmeier um 1940 vorgenommen wurde. Er unterschied zwischen Einzelflecken (Typ A/B) bis hin zu riesigen schattierten Gebieten (Typ E/F) sowie der anschließenden Rückbildung. Sein Schema der Fleckentypen ist leicht erkennbar und entsprach auch der zeitlichen Entwicklung. Seitdem spricht man in diesem Zusammenhang von der Waldmeier-Klassifikation. Bei den gemachten Bildern (Abbildung 4 und 5) handelt es sich einmal um einen Einzelfleck mit Penumbra, der nicht zu einer Gruppe gehört, und um eine Fleckengruppe, die Gruppenflecken

mit und ohne Penumbra beinhaltet. Mit Penumbra werden von Astronomen jene Gebiete innerhalb der Sonnenflecken bezeichnet, die dunkler als die normale Sonnenoberfläche sind. Die Flecken entsprechen ungefähr den Waldmeier-Klassen C I/II. [5]

Sonnenforschung

Wie bereits erwähnt, haben sich die Menschen bereits sehr früh mit der Sonne beschäftigt. Aber erst das Teleskop brachte den Durchbruch in der Forschung. Nachdem man Sonnenflecken bereits mit bloßem Auge bei guten Bedingungen (Typ E/F und Sonnenuntergang) erkennen konnte, war man natürlich neugierig, was die Vergrößerung ans Licht bringen würde. 1610 beobachteten Galileo Galilei und Thomas Harriot zum ersten Mal Sonnenflecken durch ein Teleskop und bereits ein Jahr später führte Johann Fabricius in der ersten wissenschaftlichen Abhandlung zu diesem Thema richtig aus, dass das Wandern der Flecken mit der Eigenrotation der Sonne zusammenhing. Galilei brachten die Sonnenflecken nur wieder neue Probleme mit der Kirche ein, nach deren Vorstellung die Sonne vollkommen zu sein habe.

Zur Erforschung der Sonne sind auf der Erde einige Sonnenobservatorien errichtet worden. Diese enthalten spezielle Teleskope zur Beobachtung von



Abb. 5: Sonnenflecken, Ausschnitt der Übersichtsaufnahme [1].

Erscheinungen in der sog. Sonnenatmosphäre. Besonders herauszuheben sind dabei die H-alpha-Teleskope, die mit speziellen Interferenzfiltern ausgestattet sind, so dass die Sonnenstrahlen nur einen schmalen Spektralbereich von kleiner 0,1 nm passieren, der genau der Wellenlänge des angeregten Wasserstoffs entspricht. H-alpha ist die hellste Wasserstofflinie im Sonnenlicht, weshalb die Sonne besonders deutlich ihre eigentliche Struktur offenbart (siehe Abbildung 6). So lassen sich Sonnenfackeln, Flares und Protuberanzen wesentlich besser beobachten. Spezielle Sonnentelkope sind heute auch für Amateure bezahlbar, während Erweiterungen für vorhandene Teleskope immer noch aufgrund der technisch anspruchsvollen Interferenzfilter sehr teuer sind.

Neben den Observatorien wurden zur weiteren Erforschung der Sonne seit den 1970er Jahren auch mehrere Raumsonden gestartet. Aufgrund der Strahlung und hohen Temperatur ein nicht eben leichtes Unterfangen. Die Raumsonde Ulysses startete 1990 im Auftrag der NASA/ESA zur Sonne, um die Pole näher zu untersuchen. Sie näherte sich vorsichtig der Sonne, über den Umweg des Jupiters durch ein Swing-by-Manöver (ausführliche Beschreibung in [7]), und konnte so zweimal die Pole überfliegen. Die Mission war ein voller Erfolg und wurde erst 2009 eingestellt. Bis zu diesem Zeitpunkt konnten u.a. die Sonnenkorona, die Sonnenwinde, Sonnenmagnetfeld und kosmische Strahlen besser als jemals zuvor untersucht werden. Nebenbei wurden noch Messungen am Jupiter während des Vorbeiflugs vorgenommen. [10]

Fünf Jahre später, im Jahr 1995, wurde die Sonde Solar and Heliospheric Observatory (SOHO) auf den Weg zur Sonne geschickt. Auch dies war bzw. ist eine Gemeinschaftsoperation von ESA und NASA. SOHO befindet sich in einem Halo-Orbit von 600.000 km Radius und macht täglich Aufnahmen der Sonne. 12 verschiedene Experimente werden auf der Sonde ausgeführt. Die ESA hat den Haupt-

anteil an der Mission und stellt neun Experimente, während die NASA die restlichen drei auswertet. SOHO ermöglicht mit ihren Messungen die Vorhersagbarkeit von Sonneneruptionen und Stürmen. Zusätzlich entdeckte die Sonde über tausend bisher unbekannte Kometen, die der Sonne näher als 800.000 km kamen. [11]

Wiederum gute fünf Jahre nach SOHO startete 2001 die Raumsonde Genesis, um zweieinhalb Jahre lang Sonnenwindproben aufzunehmen und diese zurück zur Erde zu bringen. 2004 gelang dieses Vorhaben auch, obwohl die Kapsel mit den Proben aufgrund eines Fallschirmdefekts ungebremst auf dem Erdboden einschlug. Ob die Mission daher ein Erfolg war, kann noch nicht abschließend gesagt werden, da nur noch wenige Proben intakt waren. Diese werden immer noch hinsichtlich ihrer Isotopenzusammensetzung in verschiedenen Laboren untersucht, sind aber aufgrund des Einschlags teilweise konterminiert. [12]

Nach weiteren fünf Jahren (man kann hier schon von einem Zyklus sprechen) starteten 2006 zwei Sonden mit dem Namen Solar TERrestrial RE-

lations Observatory (STEREO) zur Sonne (siehe Abbildung 7), um zum ersten Mal dreidimensionale Bilder von ihr aufnehmen zu können. Dadurch wurde es möglich die Wechselwirkung der Teilchenausbrüche und Felder mit der Magnetosphäre der Erde in 3D zu betrachten. Beide Sonden sind fast baugleich und besitzen ausfahrbare Sonnenkollektoren. Die Datenübertragung zur Erde erfolgt mit 720 kBit/s. Jede Raumsonde besitzt einen Speicher von 1 GByte, um aufgenommene Daten ausreichend zwischenspeichern zu können. Nach acht Jahren Umlaufzeit, werden sich beide Sonden wohl auf der erdabgewandten Seite der Sonne begegnen, da die eine Sonde etwas langsamer die Sonne umkreist als die andere. [13]

Fast im üblichen Zeitzyklus startete 2010 die bisher letzte Mission zur Sonne – der SOHO-Nachfolger Solar Dynamics Observatory (SDO). SDO soll die dynamischen Vorgänge der Sonne näher untersuchen und die Messungen von SOHO fortführen. SDO hat drei Instrumente an Bord, die zur Messung der solaren extremultravioletten Strahlung und solaren

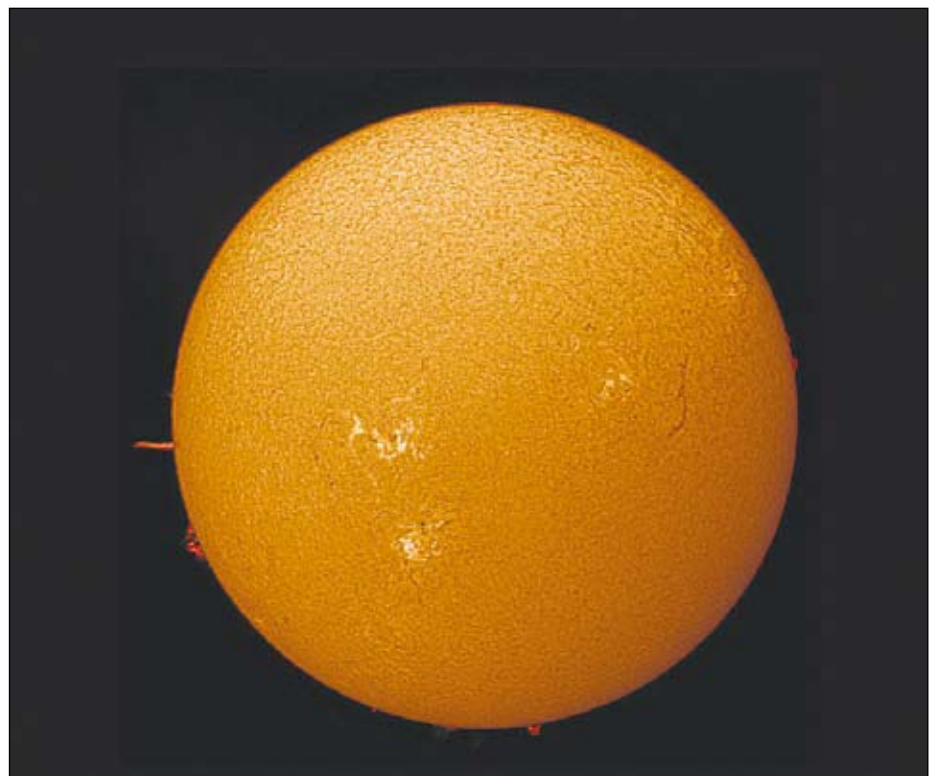


Abb. 6: Aufnahme der Sonne im H-alpha-Spektrum [8].

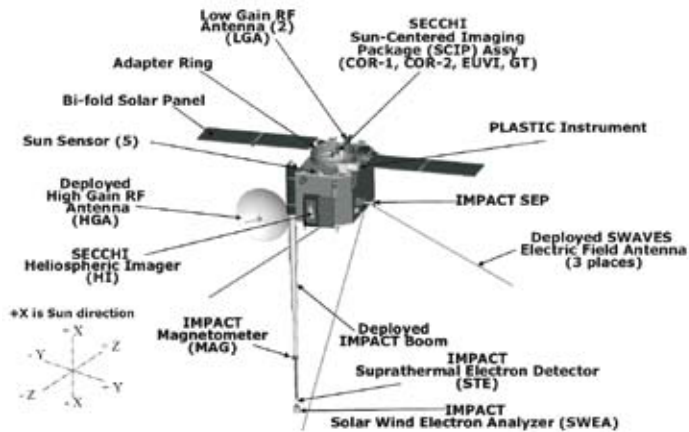


Abb. 7: Aufbau der STEREO-Sonden [9].

Veränderlichkeiten dienen sowie die Abbildung der Sonne in neun verschiedenen Wellenlängenbereichen ermöglicht. Die Datenrate zur Erde wird bis zu 300 MBit/s betragen, wodurch eine Datenmenge von bis zu 1,5 Terabyte erreicht wird. Das stellt eine ganz neue Dimension zu bisherigen Sonden dar. Angesetzt sind fünf Jahre für die Mission, wobei Treibstoff für zehn Jahre mitgeführt wird. [14]

Ausblick

Die Erforschung der Sonne ist noch lange nicht abgeschlossen. Viele Vorgänge in ihrem Inneren wissen wir noch nicht. Auch der Zyklus der Sonnenaktivitäten und deren Auswirkungen auf unser Leben auf der Erde bringen immer wieder neue Überraschungen zutage. So widersprachen sich unterschiedliche Wissenschaftler sehr stark, als das Minimum sich

immer weiter in die Länge zog bzgl. der Gründe und der Auswirkungen. Aufgrund dessen sind weitere Sonden vorgesehen, die weitere Messungen durchführen und Daten zur Erde funken sollen. So plant China ab 2012 den Start von drei Raumsonden und die ESA will nach typischem 5-Jahres-Zyklus 2015 sich weiter der Sonne nähern, um mit dem Solar Orbiter noch detaillierter Aufnahmen machen zu können. Dabei soll Licht in die Frage gebracht werden, warum sich die Sonnenkorona bis zu 5 Millionen Grad Celsius aufheizen kann, obwohl die sichtbare Oberfläche nur um die 5.500 Grad Celsius heiß ist. Auch ist bisher unklar, wie die Teilchen des Sonnenwindes beschleunigt werden. Somit gibt es noch einiges zu entdecken, was dank der heutigen Raumsonden auch machbar erscheint.

Kai-Oliver Detken



Literaturhinweise

- [1] Diese Aufnahmen wurden vom Artikel-Autor selbst gemacht
- [2] Urheber Georg Johann: diese Abbildung untersteht der GNU-Lizenz Version 1.2 oder einer späteren Version von der Free Software Foundation und darf unter Angabe der Quelle kopiert, verbreitet und/oder modifiziert werden
- [3] Michael Stix: On the time scale of energy transport in the sun. Solar Physics 212 (2002)
- [4] AstroInfo: Sonnenflecken und Polarlichter. Sonnenaktivitäten werden monatlich seit dem Jahr 2001 dargestellt; URL: <http://news.astronomie.info/sky201012/sunactivity.html>
- [5] The INTER-SOL Program (ISP): Beispiel 2 – Klassifikation nach Waldmeier; URL: <http://www.inter-sol.org/EXAMPL2D.HTM>; Volkssternwarte Paderborn e.V. in Deutschland
- [6] Fachgruppe Sonne VdS; URL: <http://www.vds-sonne.de/index.php>. Wilhelm-Foerster- Sternwarte, Berlin
- [7] Kai-Oliver Detken: Reise zu den Sternen: Die Voyager-Missionen; Die Himmelspolizey Ausgabe 01/11; Vereinszeitschrift der Astronomische Vereinigung Lilienthal e.V.; ISSN 1861-2547; Lilienthal 2011
- [8] Urheberin Birgit Kremer: diese Abbildung untersteht der GNU-Lizenz Version 1.2 oder einer späteren Version von der Free Software Foundation und darf unter Angabe der Quelle kopiert, verbreitet und/oder modifiziert werden. Aufnahme am 13. Juni 2005 auf Marbella, Spanien
- [9] Diese Datei ist gemeinfrei (public domain), da sie von der NASA erstellt worden ist. Die NASA- Urheberrechtsrichtlinie besagt, dass „NASA-Material nicht durch Urheberrecht geschützt ist, wenn es nicht anders angegeben ist“.
- [10] Bernd Leitenberger: Ulysses. URL: <http://www.bernd-leitenberger.de/ulysses.shtml>
- [11] Bernd Leitenberger: SOHO. URL: <http://www.bernd-leitenberger.de/soho.shtml>
- [12] Bernd Leitenberger: Genesis. URL: <http://www.bernd-leitenberger.de/genesis.shtml>
- [13] Solar TERrestrial RELations Observatory: <http://stereo.gsfc.nasa.gov>
- [14] Solar Dynamics Observatory: <http://sdo.gsfc.nasa.gov>
- [15] Virtueller Besuch des freien dreidimensionalen Modells von Stonehenge: <http://vizerra.com/de/locations/stonehenge>
- [16] Webseite von Newgrange: <http://www.newgrange.com/>
- [17] Klaus G. Strassmeier: Aktive Sterne. Laboratorien der solaren Astrophysik, Wien und New York 1997