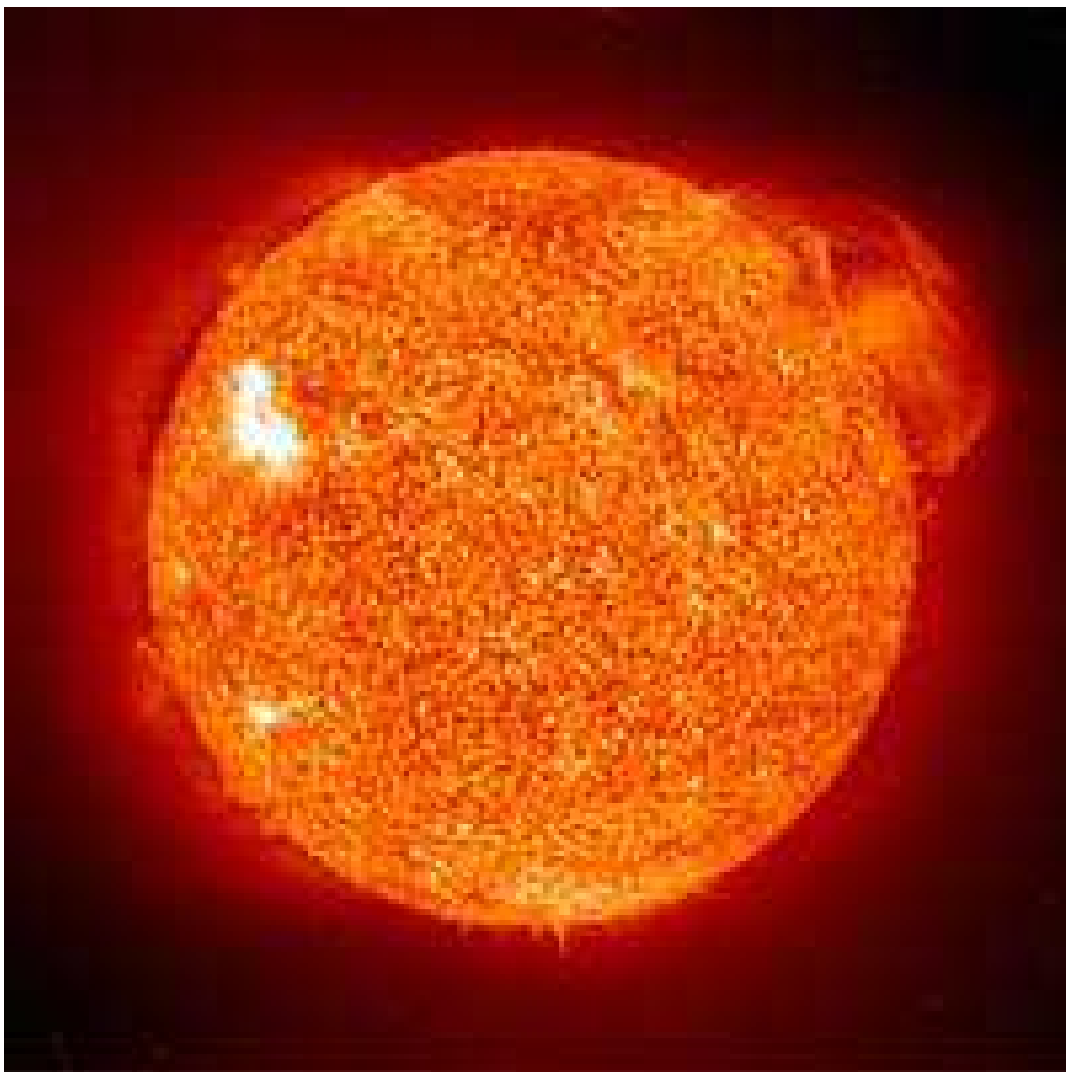


Astronomie und Astrophysik

Die Sonne

**von
Andreas Schwarz**



Stand: 28.06.2016

0.0 Inhaltsverzeichnis

1.0 Einleitung.....	3
2.0 Die Entstehung der Sonne.....	4
3.0 Der Aufbau der Sonne.....	5
3.1 Der innere Aufbau der Sonne.....	5
3.2 Die Sonnenatmosphäre.....	7
4.0 Die Sonnenaktivität.....	8
4.1 Die Sonnenflecken.....	9
4.2 Die Fackeln.....	11
4.3 Protuberanzen.....	12
4.4 Sonneneruptionen (Flares und koronale Massenauswürfe).....	14
4.5 Die Radio- und Röntgenstrahlung der Sonne.....	15
5.0 Solar-terrestrische Beziehungen	17
6.0 Die weitere Entwicklung der Sonne und ihr Ende.....	19
7.0 Schlusswort.....	22
8.0 Literatur-, Quellen- und Bilderverzeichnis.....	23

1.0 Einleitung

Die Sonne ist ein gelber Zwergstern mit einer Oberflächentemperatur von rund 5.800 Kelvin (K) vom Spektraltyp G 2 V. Ihre Masse beträgt $1,98 \cdot 10^{30}$ Kg, was 333.000 Erdmassen entspricht. 99,86 Prozent der Masse des Sonnensystems ist in der Sonne vereinigt. Der kleine Rest verteilt sich auf Planeten, Zwergplaneten, Trabanten, Kleinplaneten, Kometen, Staub und sonstige Materie im Sonnensystem. Der Sonnenradius beträgt 695.900 km und ihre Leuchtkraft $3,826 \cdot 10^{26}$ W. Die scheinbare Helligkeit der Sonne beträgt $-26,78$, ihre absolute $4,84$. Die Sonne rotiert differenziell, in rund 25,38 Tagen um ihre Achse, wobei ihre Achse um 7° gegenüber der Ekliptik geneigt ist. Sie besitzt nur 0,5 Prozent des Drehimpulses vom gesamten Sonnensystem. 99,5 Prozent des Drehimpulses verteilen sich auf alle anderen Objekte des Sonnensystems. Ein Modell, welches die Entstehung der Sonne und des Sonnensystems beschreibt, muss unter anderem die extreme Aufteilung von Masse und Drehimpuls zwischen der Sonne und den übrigen Objekten des Sonnensystems erfolgreich erklären können. Im Prinzip ist die Sonne eine Gaskugel im hydrostatischen Gleichgewicht. Aufgrund der Gravitation würde diese Gaskugel kollabieren. Die entgegenwirkende Zentrifugalkraft aufgrund der Sonnenrotation ist viel zu schwach, um der Gravitation entgegenzuwirken. Vielmehr wirken der durch die kinetische Energie der Gasteilchen erzeugte Gasdruck und der in der Sonne vorherrschende Strahlungsdruck der Gravitation entgegen. Da die Sonnenmaterie, hauptsächlich ein Plasma aus Wasserstoffkernen, Heliumkernen und Elektronen, vereinfacht wie eine Flüssigkeit beschrieben werden kann und alle gegensätzlich wirkenden Kräfte im Gleichgewicht sind, wird von einem hydrostatischen Gleichgewicht gesprochen. Die Temperatur ist ein Maß für die kinetische Energie der Gasteilchen. Je höher die kinetische Energie der Gasteilchen, desto höher ist die Temperatur. Energiequelle für die kinetische Energie der Gasteilchen und der in der Sonne erzeugten Strahlung ist die Kernfusion. Dabei werden pro Sekunde 616 Millionen Tonnen Wasserstoff in 612 Millionen Tonnen Helium umgewandelt. Die Differenz von 4 Millionen Tonnen wird gemäß der Formel $E = mc^2$ in Energie umgewandelt. Dabei handelt es sich um Strahlungsenergie und die kinetische Energie von Neutrinos. Die Sonne wird oft als Maßstab für andere Sterne verwendet. So werden zum Beispiel die Massen, Radien und Leuchtkräfte von Sternen in Sonnenmassen (M_\odot), Sonnenradien (R_\odot) und Sonnenleuchtkräfte (L_\odot) angegeben. Die Sonne ist aufgrund ihrer Nähe zur Erde auch ein dankbares Beobachtungsobjekt, da alle anderen Sterne sehr weit von uns entfernt sind und uns nur noch als Lichtpunkte erscheinen. Die mittlere Entfernung Erde – Sonne beträgt 149.597.871 Kilometer und wird als Astronomische Einheit (AE) definiert. Für diese Strecke benötigt das Licht 8,3 Minuten. Der nächste Stern Proxima Centauri ist bereits 4,3 Lichtjahre entfernt, was in etwa 40 Billionen Kilometer entspricht. Aufgrund der relativen Nähe der Sonne zur Erde können wir Einzelheiten auf der Sonne beobachten. So wurden bereits relativ früh die sogenannten Sonnenflecken entdeckt. Sonnenflecken sind Gebiete auf der Sonne, deren Temperatur etwa 1.000 Kelvin unterhalb der Oberflächentemperatur der Sonne liegt. Sie erscheinen daher dunkel. Erzeugt werden sie durch Magnetfelder, welche in diesen Bereichen aus der Sonnenoberfläche treten oder wieder eintreten. Im Gegensatz dazu sind die Fackeln wiederum Gebiete, die heller und heißer als die Photosphäre sind. Sie gleichen im Prinzip das durch die Sonnenflecken erzeugte Temperaturdefizit wieder aus und sind mit ihnen assoziiert. Es gibt noch anderen Formen von Sonnenaktivität, etwa Sonneneruptionen und Protuberanzen. Ursache für die Sonnenaktivität ist vor allem das Magnetfeld der Sonne, welches aufgrund der differentiellen Rotation des Sonnenplasmas wie in einem Dynamo entsteht. Während die Oberflächentemperatur bei rund 5.800 Kelvin liegt, beträgt die Temperatur im Kernbereich der Sonne etwa 15 Millionen Kelvin. Aufgrund des großen Druckes und der hohen Temperatur im Innern der Sonne kann die Kernfusion von Wasserstoff zu Helium stattfinden. Von dort wird die Energie zunächst in Form von Strahlung transportiert. Im Außenbereich der Sonnenkugel erfolgt der Energietransport durch Konvektion. Die Sonnenatmosphäre besteht aus der Photosphäre, Chromosphäre und der Korona. Nachfolgend wird ausführlich auf die Entstehung, den Aufbau und die Entwicklung der Sonne eingegangen und es werden alle hier genannten Stichworte ausführlich erläutert.

2.0 Die Entstehung der Sonne

Die Sonne ist vor 4,56 Milliarden Jahren aus einer kollabierenden und kühlen Molekülwolke entstanden, welche hauptsächlich aus Wasserstoff und Helium bestand. Nach neueren Forschungsergebnissen dürfte eine Supernova bei der Entstehung der Sonne und des Sonnensystems mitgewirkt haben. Diese könnte die Entstehung der Sonne getriggert haben. Der relativ hohe Anteil von Elementen schwerer als Helium (1,9 %) und bestimmte Isotope in der ursprünglichen Materie, aus der die Sonne und das Sonnensystem entstanden, deuten darauf hin. Im Falle der Sonne war die Anfangsmasse deutlich größer als die Sonnenmasse. In der Regel entstehen aus einer Molekülwolke auch mehrere Sterne, die zunächst offene Sternhaufen bilden, welche sich nach relativ kurzer Zeit auflösen. Aufgrund von Dichteschwankungen in der Molekülwolke, z.B. hervorgerufen durch eine Supernova, kommt es zur stärkeren Konzentration von Materie an bestimmten Orten und damit auch zum Anstieg der Gravitation. Wenn diese Konzentration stark genug ist, überwiegt die Gravitation und es kommt zum Kollaps. Erforderlich hierfür ist, dass die potentielle Energie aufgrund der kollabierenden Verdichtung größer als die kinetische Energie der Gasteilchen ist. Dies wird als Jeans-Kriterium (nach James Jeans) bezeichnet. Dies tritt bei einem bestimmten Massenwert auf, welcher als Jeans-Masse bezeichnet wird. Zunächst stoßen beim Kollaps Gasteilchen zusammen und der Staub in den Wolken strahlt Infrarotstrahlung ab. Diese Strahlung kann ungehindert entweichen, so dass die Wolke vorläufig kühl bleibt. Wenn allerdings der Kern des Kollapses eine kritische Dichte erreicht, wird er optisch undurchsichtig und Strahlung kann nicht mehr entweichen. Aufgrund der steigenden Temperatur verlangsamt sich der Kollaps und es bildet sich ein vorläufiges hydrostatisches Gleichgewicht aus. Bis hierhin dauert die Entwicklung etwa eine Million Jahre. Der Kollaps geht allerdings trotzdem weiter, da von außen weiterhin Materie auf den entstehenden Stern fällt. Aufgrund der Kontraktion der Materie wird potentielle Energie frei, so dass der entstehende Stern an Leuchtkraft gewinnt. In dieser Phase wird die Energie nicht durch Strahlung nach außen transportiert, sondern durch Konvektion, dem Aufsteigen von heißer Materie und dem Absinken von kälterer, wie im Falle von kochendem Wasser in einem Topf, welcher auf dem Herd steht. Ab einer Kerntemperatur von 2.000 K dissoziiert der molekulare Wasserstoff (H_2) in Wasserstoffatome (H). Bei diesem Vorgang wird Energie verbraucht. Die Temperatur im Kern des entstehenden Sterns nimmt vorläufig wieder ab, seine Leuchtkraft auch. Allerdings geht der Kollaps weiter, bis eine Kerntemperatur von 10.000 K erreicht wird. Bei dieser Temperatur wird der Wasserstoff ionisiert, d.h. die Elektronen sind nicht mehr an die Protonen gebunden. Es bildet sich ein Plasma. Der entstehende Stern wird wieder optisch dick, so dass der Gasdruck und die Temperatur weiter steigen. Beim Überschreiten der sogenannten Hayashi-Linie wird die Gravitationsenergie vollständig in Wärme umgewandelt. An dieser Grenze ist der Stern nicht mehr voll konvektiv, ein Teil des Energietransports nach außen erfolgt dann durch Strahlung. Beim Erreichen einer Kerntemperatur von etwa 10 Millionen K startet die Kernfusion von Wasserstoff zu Helium. Der Stern ist dann geboren. Nicht die ganze Materie ist für die Sonnenentstehung verbraucht worden. Um den entstehenden Stern bildet sich eine sogenannte Akkretionsscheibe, welche den Drehimpuls aufnimmt und so dem entstehenden Stern die Aufnahme von weiterer Materie erst ermöglicht. Ohne den Wegtransport des Drehimpulses kann die Materie nicht aufgenommen werden, so dass nicht genügend Masse für den erforderlichen Druck und für die erforderliche Temperatur zur Zündung der Kernfusion zur Verfügung stehen würde. Jedoch wird die Akkretionsscheibe nicht vollständig bei der Sternentstehung verbraucht. Aus nicht hierfür verbrauchter Materie bildete sich schließlich die protoplanetare Scheibe, aus der die Planeten und die sonstigen Objekte des Sonnensystems entstanden. Dieser Vorgang ist nicht nur auf die Sonnenentstehung beschränkt, sondern ein normaler Vorgang bei der Sternentstehung. Aus diesem Grunde ist die Existenz von extrasolaren Planeten ein regelmäßiges Produkt der Sternentstehung. Insgesamt benötigte die Entstehung der Sonne vom Beginn des Kollapses der kalten Molekülwolke bis zum Start der Kernfusion, der Geburt eines Sterns, einen Zeitraum von etwa 30 Millionen Jahren.

3.0 Der Aufbau der Sonne

Der Sonnenaufbau lässt sich grob unterteilen in innerer Aufbau und Sonnenatmosphäre. Der innere Aufbau der Sonne lässt sich wiederum unterteilen in Kern, Strahlungszone und Konvektionszone. Die Sonnenatmosphäre besteht wiederum aus Photosphäre, Chromosphäre und Korona. Nachfolgend soll der Aufbau der Sonne von innen nach außen dargestellt werden.

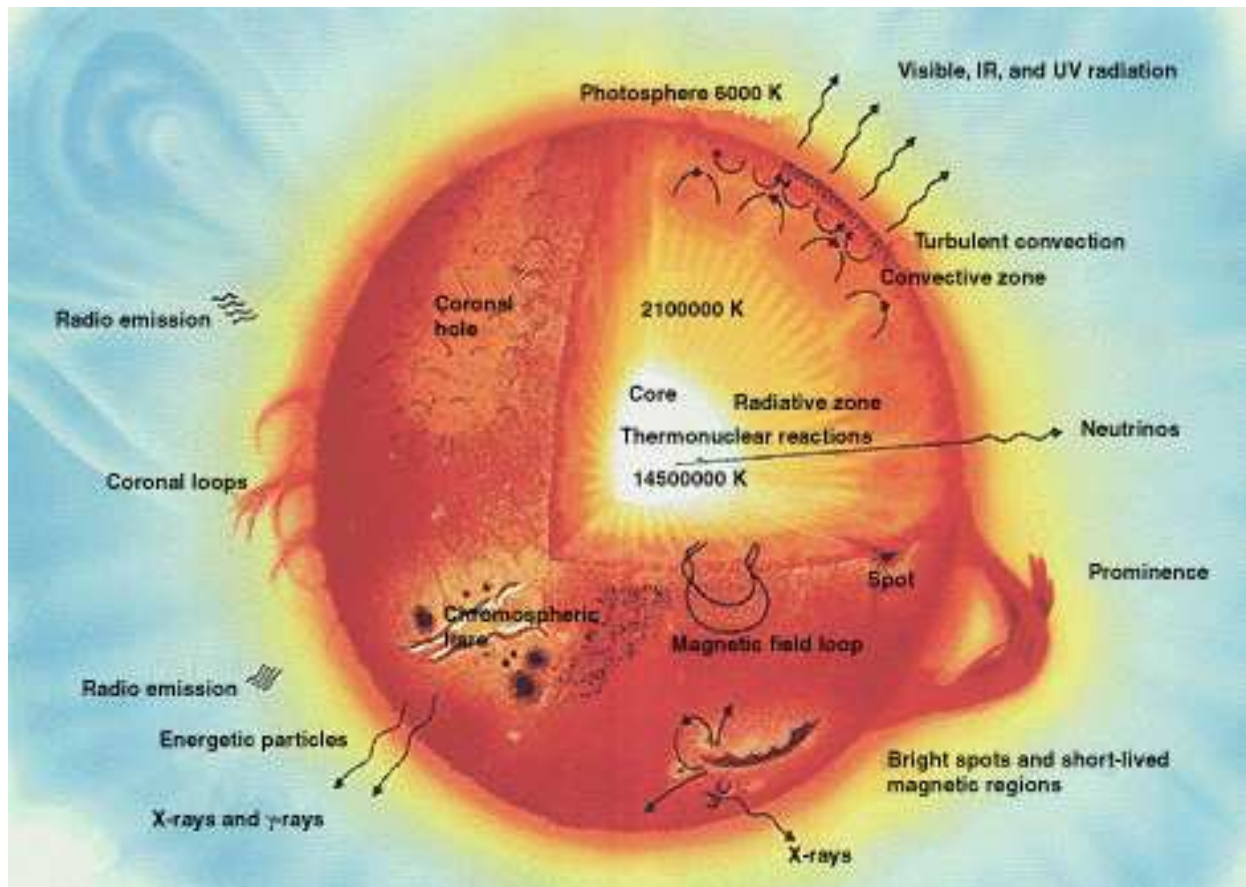


Bild 1: Der Aufbau der Sonne / Quelle Wikipedia

3.1 Der innere Aufbau der Sonne

Der **Sonnenkern** nimmt etwa 1/64 des Sonnenvolumens ein, doch ist in ihm rund 50 Prozent der Sonnenmasse konzentriert. Sein Radius beträgt etwa 0,25 Sonnenradien bzw. er ist etwa 175.000 km dick. Im Sonnenkern sind der Druck und die Temperatur ausreichend, um die Fusion von Wasserstoff zu Helium zu ermöglichen. Die Kernfusion läuft hauptsächlich in Form des Proton-Proton-Prozess ab:



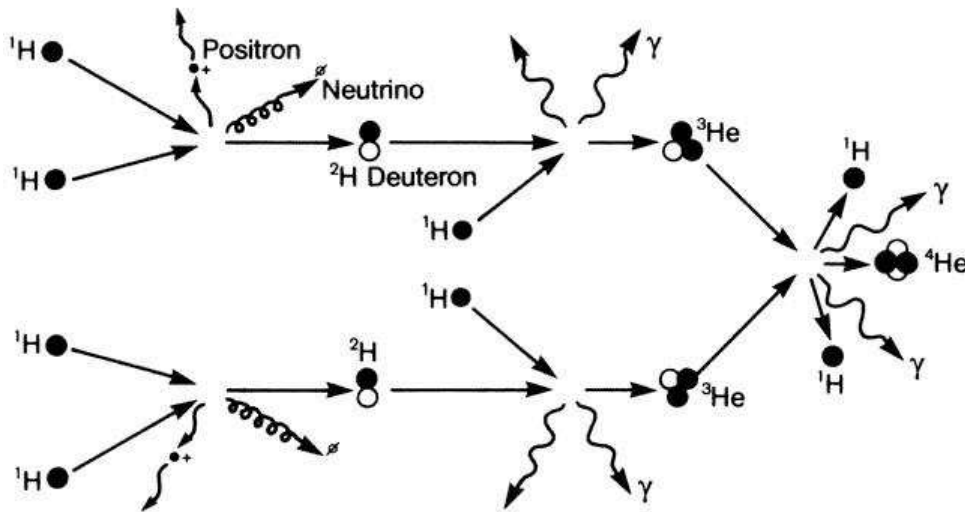
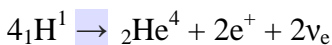


Bild 2: Der Proton-Proton-Prozess / Quelle <http://www.fakko.de/school/sonne/aufbau.htm>

Es gibt im Falle der Proton-Proton-Reaktion noch andere Reaktionen, die ebenfalls in der Sonne ablaufen. Des Weiteren gibt es noch den sogenannten Kohlenstoff-Stickstoff-Sauerstoff-Zyklus, bei dem Kohlenstoff als Katalysator verwendet wird. Diese Reaktionen sind jedoch im Vergleich zum oben dargestellten Proton-Proton-Prozess nicht vorherrschend und können daher bei der Darstellung vernachlässigt werden. Netto werden im Ergebnis vier Wasserstoffkerne (Protonen) zu einem Heliumkern (bestehend aus zwei Protonen und zwei Neutronen) fusioniert:



Die relative Atommasse des Wasserstoffs beträgt 1,008, die des Heliums 4,003. Angewendet auf obere Gleichung ergibt sich:

$$4 \cdot 1,008 = 4,032$$

Die Massendifferenz zwischen den vier Wasserstoffkernen und dem Heliumkern beträgt:

$$\Delta m = 4,032 - 4,003 = 0,29$$

Dies entspricht 0,7 Prozent der Masse, welche gemäß der nachfolgenden Formel in Energie umgewandelt wird:

$$\Delta E = \Delta mc^2$$

Die Masse der Ausgangsteilchen ist größer als die des Produktteilchens. Die Massendifferenz wird in Energie umgewandelt. Ein Teil der Energie verlässt in Form von energiereichen Photonen (γ , Strahlung) den Kern, der andere Teil in Form von Neutrinos (ν_e). Die Neutrinos wechselwirken fast überhaupt nicht mit Materie, so dass sie direkt die Sonne verlassen, sich fast mit Lichtgeschwindigkeit bewegen und nach etwas mehr als acht Minuten die Erde erreichen. Die Photonen haben es da deutlich schwerer, da sie auf ihren Weg zur Sonnenoberfläche immer wieder in Wechselwirkung mit der Sonnenmaterie geraten. Sie werden absorbiert und wieder emittiert sowie gestreut und verlieren dadurch auch an Energie. Es dauert viele Hunderttausend Jahre, bis ein im Kern entstandenes Photon die Sonnenoberfläche erreicht und von dort aus abgestrahlt wird. Seit ihrer Entstehung hat die Sonne etwa die Hälfte ihres Wasserstoffvorrats im Kern verbraucht.

Die Strahlungszone in der Sonne nimmt etwa die Hälfte des Sonnenvolumens ein und hat eine Dicke von rund 370.000 km. In diesem Bereich ist die Sonnenmaterie hoch ionisiert, liegt also als Plasma vor. Für Strahlung (Photonen) ist dieser Bereich durchlässig, jedoch nicht frei von Wechselwirkungen mit dem Sonnenplasma. Die durch Kernfusion erzeugten kurzwelligen bzw. energiereichen Photonen (Gamma-Strahlung) werden von den Ionen des Sonnenplasmas gestreut sowie absorbiert und reemittiert. Dadurch verlieren sie Energie bzw. werden langwelliger. Aufgrund des Temperaturgefälles von innen nach außen läuft der Strahlungstransport jedoch nicht ungeordnet sondern gerichtet von innen nach außen. Auf diese Weise wird die Energie vom Sonneninnern weiter in die äußeren Bereiche der Sonnenkugel transportiert. Da in diesem Bereich keine Konvektion stattfindet, bleibt das durch Kernfusion entstandene Helium im Kern konzentriert und es findet keine Durchmischung statt.

Die Konvektionszone nimmt den restlichen Bereich der Sonnenkugel ein und hat etwa eine Dicke von 150.000 km. In diesem Bereich ist die Temperatur bereits so niedrig, dass der Wasserstoff nicht mehr vollständig ionisiert ist. In Folge wird die Sonnenmaterie auch für Strahlung undurchlässig und es entsteht ein Energiestau, der durch Konvektion abgebaut wird. Konvektion bezeichnet den Vorgang, bei dem heiße Gasmassen nach oben steigen und kühlere wieder nach unten sinken. Dieser Vorgang lässt sich, wie bereits oben beschrieben, mit kochendem Wasser in einem Kochtopf über der Herdplatte vergleichen. In der oberen Schicht der Sonnenkugel bilden sich aufgrund des Konvektionsvorgangs Zellstrukturen heraus. In der Mitte der Zellen steigt das heiße Gas nach oben, in ihren Rändern sinkt das kühlere Gas wieder nach unten. Die Temperaturdifferenz zwischen heißerem und kühlerem Gas beträgt etwa 200 – 300 K. Dieser Vorgang erscheint in der Photosphäre der Sonne als sogenannte Granulation, die Sonnenoberfläche bzw. die Photosphäre zeigt eine körnige Struktur. Unterhalb der Oberflächengranulation befinden sich die Zellen der Supergranulation und ihre Basis sind wiederum Riesenzellen mit Durchmessern von mehreren Hunderttausend Kilometern.

3.2 Die Sonnenatmosphäre

Die Photosphäre hat eine Dicke von rund 400 km, damit ist sie im Vergleich zum Sonnenradius von rund 700.000 km sehr dünn. Von ihr aus wird fast die gesamte Strahlungsleistung der Sonne abgestrahlt. Die emittierte Strahlung deckt den gesamten Bereich des elektromagnetischen Spektrums (Gamma-, Röntgen-, ultraviolette, optische, infrarote und Radio-Strahlung) ab, das Maximum der Strahlungsleistung liegt im optischen Bereich bei einer Wellenlänge von etwa 500 Nanometern (nm, $1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$). Das ist der blau-grüne Bereich der optischen Strahlung. Allerdings erscheint die Sonne aufgrund ihres breiten Strahlungsspektrums weißlich am wolkenlosen Himmel. Je nach Zustand der Atmosphäre oder Sonnenstand wird das kurzwelligere blaue Licht im Spektrum stärker gestreut. Aus diesem Grund kann die Sonne gelblich bis rot am Himmel erscheinen. Blaues bzw. kurzwelligeres Licht wird stärker gestreut als rotes bzw. langwelligeres Licht. So erscheint die Sonne beim ihrem Aufgang oder bei ihrem Untergang rötlich. Die Farbgebung hängt allerdings auch von der Bewölkung oder von der Staubkonzentration in der Atmosphäre ab. Die Dichte der Photosphäre nimmt von innen nach außen von 10^{-7} auf 10^{-8} g/cm^3 ab. Ihre Temperatur nimmt in gleicher Richtung von 6.000 K auf 4.000 K ab. Besonders auffällig ist bei der Sonnenbeobachtung im optischen Bereich die sogenannte Mitte-Rand-Variation, auch Randverdunklung genannt. Die Photosphäre erscheint in der Mitte heller als an ihren Rändern. Bei einem Blick auf den Sonnenrand nimmt der Sehstrahl einen längeren Weg durch die Photosphäre als bei einem Blick auf die Sonnenmitte. Allerdings dringt der Sehstrahl dabei weniger tief in die Sonnenatmosphäre ein und der Blick erfolgt daher in die kühleren Schichten, welche dunkler erscheinen. Die Randverdunklung ist wellenlängenabhängig, im kurzwelligeren bzw. blauen Bereich des optischen Spektrums stärker ausgeprägt als in seinem langwelligeren bzw. roten Bereich. Im Bereich der Photosphäre zeigt die Sonne aufgrund der Konvektion das bereits oben angesprochene zellförmige Muster. Aufgrund ihres körnigen Aussehens wird dieses als Granulation bezeichnet. Die Zellen haben ein Durchmesser von etwa 1.000 km und eine Lebensdauer von etwa zehn Minuten.

Die **Chromosphäre** schließt direkt an die Photosphäre an und reicht dabei bis in etwa eine Höhe von 10.000 km. Die Dichte der Sonnenatmosphäre nimmt weiter ab und erreicht einen Wert von 10^{11} g/cm³. Allerdings nimmt die Temperatur wieder bis auf einen Wert von 100.000 K zu. Trotz dieser hohen Temperatur trägt die Chromosphäre aufgrund ihrer geringen Dichte kaum etwas zur Gesamtstrahlungsleistung der Sonne bei. Die hohen Temperaturen machen sich jedoch im Spektrum der Chromosphäre bemerkbar. In ihrem Spektrum zeigen sich Linien von hoch angeregten oder ionisierten Atomen. Des Weiteren zeigen sich Linien, welche im Spektrum der Photosphäre in Absorption erscheinen, im Spektrum der Chromosphäre in Emission. Die höheren Temperaturen in der Chromosphäre werden wahrscheinlich durch mechanische Druckwellen verursacht, welche von der Photosphäre ausgehen. Die Struktur der Chromosphäre wird vom Sonnenmagnetfeld beeinflusst. So zeigt die Chromosphäre bei einer Sonnenfinsternis eine borstige Struktur, welche sich nach den Magnetfeldlinien ausrichtet und als Spikulen bezeichnet werden. Des Weiteren zeigen sich in der Chromosphäre sogenannte Supergranulationszellen, welche einen Durchmesser von rund 30.000 km haben und an deren Rändern sich starke Magnetfelder befinden.

Die **Korona** bildet den äußersten Bereich der Sonnenatmosphäre. Ihre Dichte nimmt dabei auf 10^{-18} g/cm³ ab und geht dann in den inter-planetarischen Raum über. Die Temperatur der Korona steigt auf bis zu einer Million Kelvin. Es gibt noch keine abschließenden Erklärungen für die hohe Temperatur der Sonnenkorona, doch wird vermutet, dass die Energie aufgrund der Magnetfelder in die Korona transportiert wird. Ebenfalls könnten, wie im Falle der Chromosphäre, mechanische Druckwellen eine Rolle spielen. Als relativ gesichert gilt, dass die Energie von innen, also von der Sonne, in die Korona transportiert wird und immer wieder in erheblichem Maße zugeführt werden muss. Die Form der Korona hängt von der Sonnenaktivität ab, auf die später noch ausführlicher eingegangen wird. Bei einem Aktivitätsmaximum ist die Korona symmetrisch um die Sonne, bei einem Minimum ist sie eher am Sonnenäquator konzentriert. Die Beobachtung der Korona ist außerhalb einer totalen Sonnenfinsternis im Radio-, Ultravioletten- und Röntgenbereich möglich. Im Röntgenbereich können die sogenannten koronalen Löcher beobachtet werden. Die Struktur dieser Löcher wird durch magnetische Feldlinien, welche von der Sonne ausgehen, bestimmt. Im Bereich der koronalen Löcher tritt der sogenannte Sonnenwind aus, welcher hauptsächlich aus Wasserstoffkernen (Protonen), Heliumkerne, einem geringeren Anteil an schwereren Atomkernen und Elektronen besteht. Konkret spiegelt sich im Sonnenwind die Zusammensetzung der Sonnenmaterie wider. Der Sonnenwind bildet die solare Komponente der Kosmischen Strahlung.

4.0 Die Sonnenaktivität

Der Begriff der Sonnenaktivität fasst die Gesamtheit der veränderlichen, relativ kurzlebigen Erscheinungen in begrenzten Bereichen auf der Sonne und in der Sonnenatmosphäre zusammen. Ursache für die Sonnenaktivität sind dynamische Prozesse im Magnetfeld der Sonne. Sie äußern sich im Ergebnis als Sonnenflecken, Fackeln, Eruptionen bzw. Flares und Protuberanzen. Die Sonnenaktivität führt auch zu Wechselwirkungen mit der Erde. So gehen zum Beispiel die Polarlichter auf die Sonnenaktivität zurück. Doch können auch das Magnetfeld der Erde oder sogar elektrische Anlagen auf der Erde beeinflusst werden. Es scheint auch Zusammenhänge zwischen dem Klima auf der Erde und der Sonnenaktivität zu geben. In der Vergangenheit wurde von solar-terrestrischen Beziehungen gesprochen. Heute wird der Begriff „Weltraumwetter“ verwendet. Dieses spielt auch für die Raumfahrt eine wichtige Rolle. Ursache für das Magnetfeld der Sonne ist ein Dynamo-Effekt in der Sonne, welche in ihren Innern aus einem Plasma besteht. Ein Plasma besteht aus positiv geladenen Atomkernen bzw. Atomionen und Elektronen. Diese geladenen Teilchen bewegen sich unter anderem aufgrund der Sonnenrotation und anderen dynamischen Prozessen und erzeugen ein Magnetfeld. Konkret kommt es zu folgenden Entwicklungen in der Sonne:

- Das Innere der Sonne rotiert langsamer und wie ein starrer Körper,
- die äußeren Schichten der Sonne rotieren schneller und differenziell.

- Durch diese Scherungen kommt der Sonnendynamo zustande,
- dieser erzeugt das Magnetfeld der Sonne, welches für die Sonnenaktivität insbesondere verantwortlich ist.

Nachfolgend wird auf die einzelnen Erscheinungsformen der aktiven Sonne ausführlicher eingegangen.

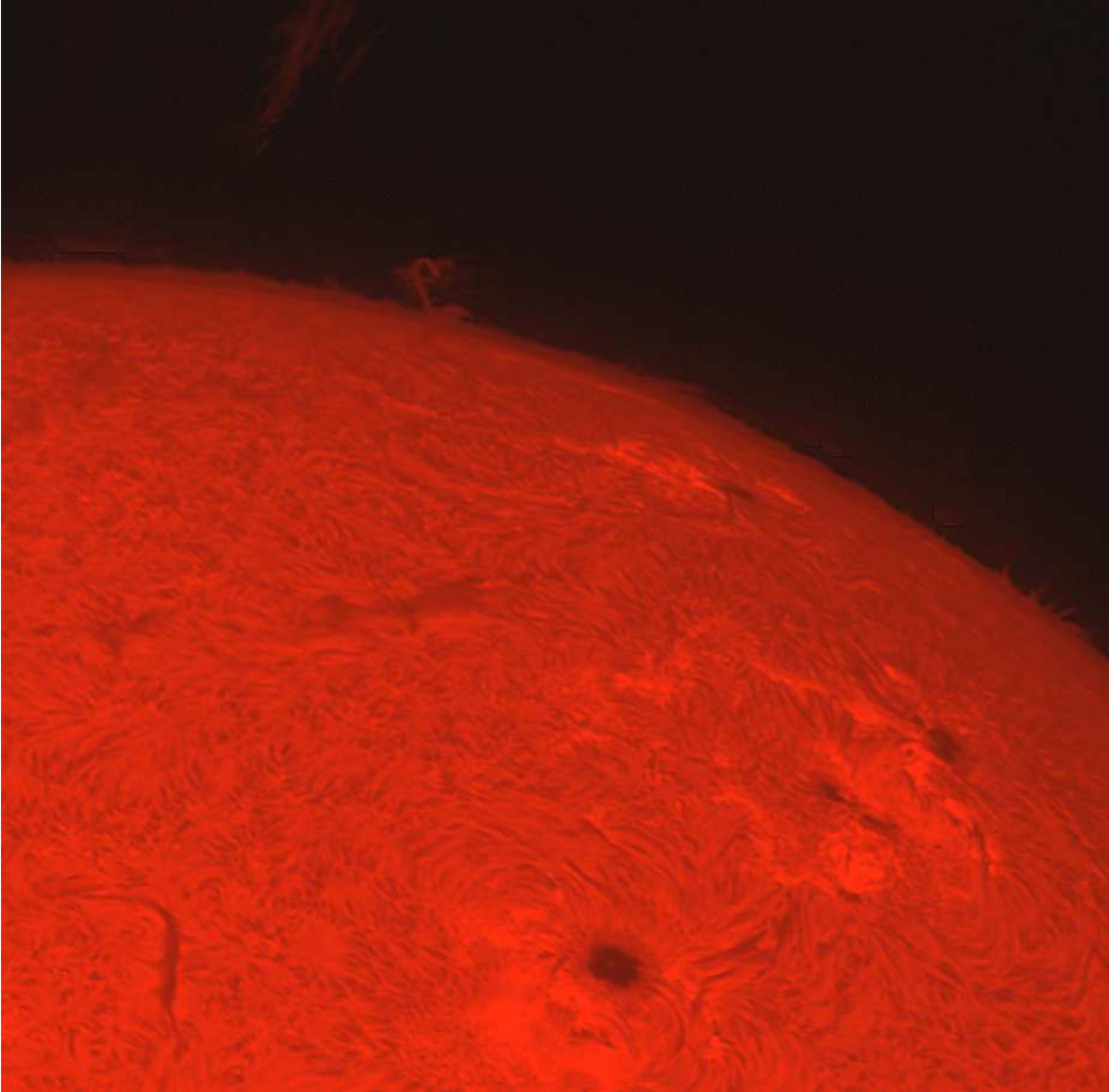


Bild 3: Die aktive Sonne mit Sonnenflecken, Fackeln und Protuberanzen (Foto von Ralf Schmidt)

4.1 Sonnenflecken

Sonnenflecken sind Austritts- und Eintrittsbereiche von magnetischen Feldlinien in der Photosphäre. Sie haben Durchmesser von 1.000 km bis 200.000 km. Sonnenflecken bestehen aus einem dunklen Kern, der Umbra, welcher von einer filamentartigen Penumbra umgeben ist. Im Gegensatz zur Temperatur der Photosphäre von 5.800 K beträgt die Temperatur in der Umbra 4.300 K und in der Penumbra 5.500 K. Aus diesem Grunde erscheinen die Sonnenflecken im Kontrast zur heißeren Photosphäre dunkel. Der Anzahl der Sonnenflecken variiert mit einem Zyklus von elf Jahren, wobei diese Zyklen seit dem Jahr 1760 durchnummeriert werden.

So begann im Jahr 2006 der 24. Zyklus. In der Regel treten die Sonnenflecken in Fleckengruppen mit mehreren Einzelflecken auf. Zu ihrer Beschreibung wurde die Relativzahl R eingeführt:

$$R = k(10g + f)$$

Gleichung: Sonnenfleckenrelativzahl

Hierbei ist k ein Korrekturfaktor, der den Einfluss des Beobachters bzw. der Beobachtungsgeräte auf das Ergebnis berücksichtigt. Mit g wird die Anzahl der Fleckengruppen und mit f die der Einzelflecken bezeichnet. Zu Beginn des Zyklus treten die Sonnenflecken in höheren heliographischen Breiten bei etwa $+35^\circ$ auf. In der Mitte des Zyklus erreichen die Sonnenflecken dann heliographische Breiten von $+8^\circ$. Werden die Positionen der Sonnenflecken für einen Zyklus in einem Diagramm eingetragen, so ergibt sich nach dem Aussehen des Diagramms ein sogenanntes Schmetterlingsdiagramm. Die Lebensdauer von Sonnenflecken beträgt in der Regel mehrere Tage. Zwischen einem alten und einem neuen Zyklus kann es für einen Zeitraum von zirka zwei Jahren noch zu Überlappungen kommen zwischen Flecken des alten Zyklus, welche sich dann in niedrigeren heliographischen Breiten befinden, und den Flecken des neuen Zyklus, die dann wieder in den höheren Breiten auftreten. Bei der Beobachtung von Sonnenflecken am Sonnenrand tritt der sogenannte Wilson-Effekt auf. Die Seite der Penumbra, welche näher zur Sonnenmitte liegt, scheint verkürzt. Hierbei handelt es sich allerdings um einen geometrischen Effekt. Linien gleicher optischer Tiefe liegen bei großen Flecken geometrisch um einige Hundert Kilometer tiefer als in der Photosphäre, was im Ergebnis zur Asymmetrie der Penumbra bzw. zum Wilson-Effekt führt. Dass die Flecken magnetischen Ursprungs sind, kann bei der Untersuchung der Spektrallinien festgestellt werden. Aufgrund von Magnetfeldern werden Spektrallinien aufgespalten, was als Zeeman-Effekt bezeichnet wird. Dieser Effekt lässt sich im Falle der Sonnenflecken beobachten. Die in den Sonnenflecken gemessenen Flussdichten können bis zu 4.000 Gauß betragen. Das Erdmagnetfeld hat eine Flussdichte von etwa 0,5 Gauß. Der magnetische Druck in den Sonnenflecken ist der Grund dafür, dass die Temperatur in ihnen geringer ist als die der Photosphäre. Es handelt sich hierbei um Schläuche von magnetischen Feldlinien, welche durch den magnetischen Auftrieb vom Inneren der Sonne an die Oberfläche getrieben werden. Die Eintritts- und Austrittsbereiche bilden dann eine bipolare Gruppe. Der vorangehende Fleck wird als p-Fleck und der nachfolgende als f-Fleck bezeichnet. Über 90 Prozent der Flecken treten als bipolare Gruppen auf. Für einen bestimmten Zyklus ist der vorangehende Sonnenfleck auf der Nordhalbkugel ein magnetischer Nordpol und der nachfolgende Fleck ein magnetischer Südpol. Auf der Südhalbkugel der Sonne ist es dann genau umgekehrt. Nach einem 11-jährigen Zyklus dreht sich das ganze um. Auf der Nordhalbkugel der Sonne ist der vorangehende Fleck dann ein magnetischer Südpol und der nachfolgende Fleck ein magnetischer Nordpol, wobei es dann auf der Südhalbkugel genau umgekehrt ist. Erst nach zirka 22 Jahren bzw. nach zwei Zyklen tritt wieder die Ausgangslage ein, wonach der vorangehende Fleck auf der Nordhalbkugel der Sonne dann wieder ein magnetischer Nordpol ist usw. Tatsächlich gibt es daher einen 22-jährigen magnetischen Zyklus der Sonnenaktivität. Dieser Zyklus wird von weiteren Zyklen überlagert, die noch größere Zeiträume einnehmen und auf die im Kapitel Solar-terrestrische Beziehungen eingegangen wird.

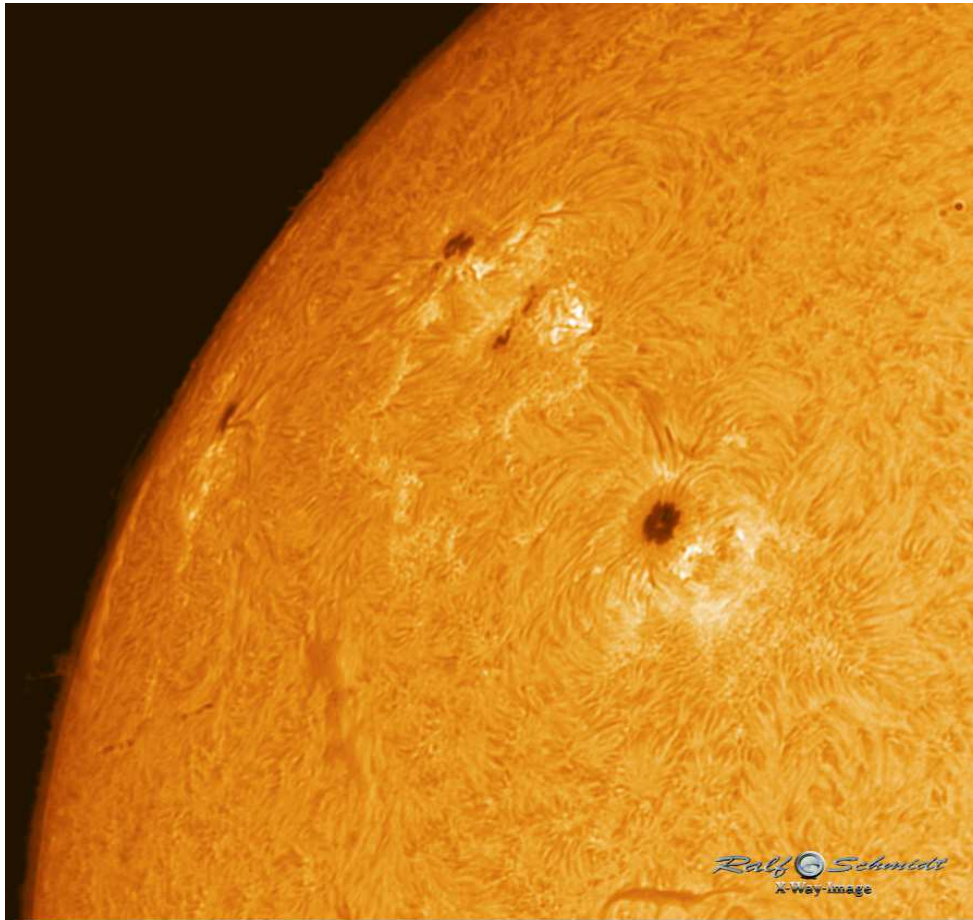


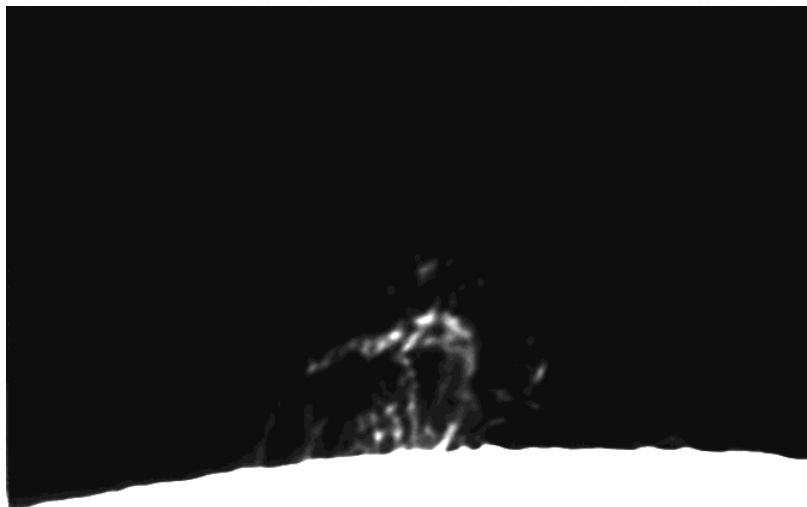
Bild 4: Sonnenflecken, die hellen Gebiete um die Flecken sind sogenannte Fackeln. Beide Erscheinungen sind miteinander assoziiert. (Foto von Ralf Schmidt)

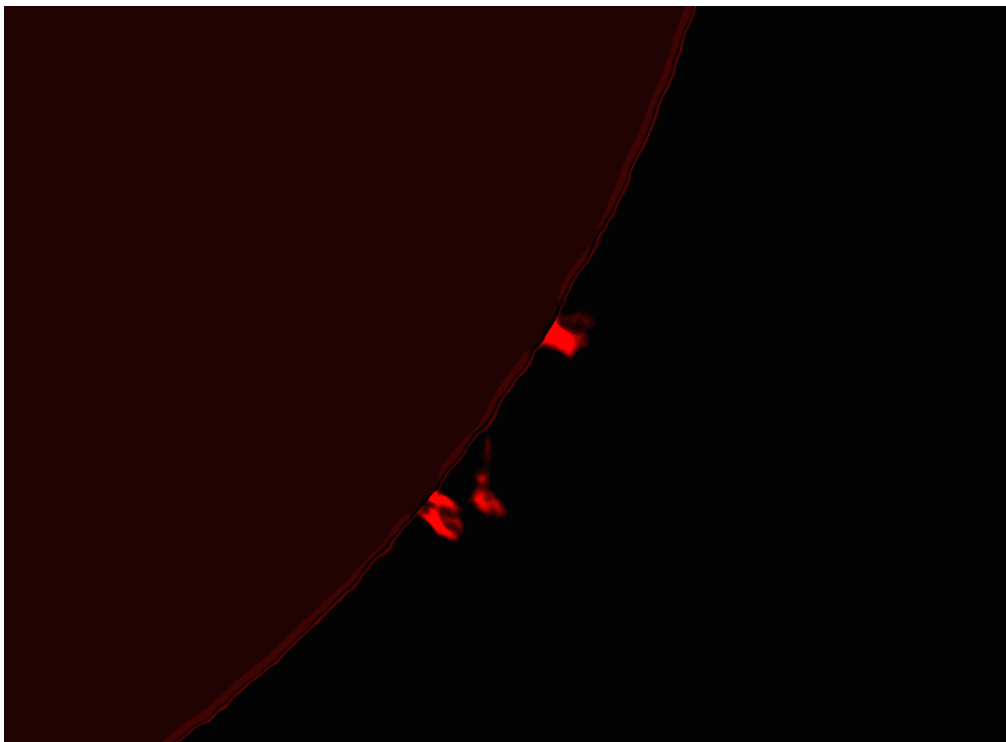
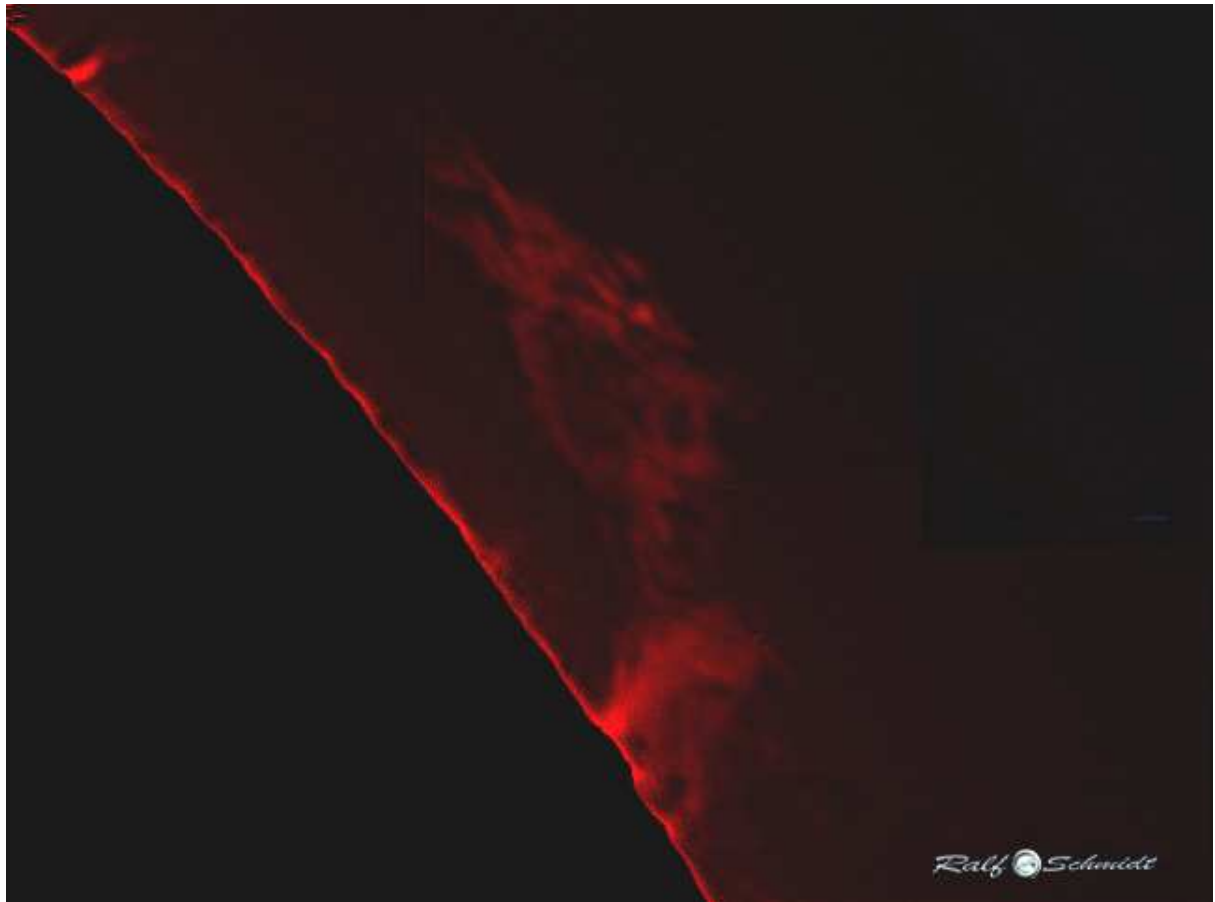
4.2 Fackeln

Im Gegensatz zu Sonnenflecken sind Fackeln ausgedehnte Gebiete mit höherer Helligkeit und Temperatur. Ihre Helligkeit ist etwa zehn Prozent höher als die der Photosphäre. Im Vergleich zur Temperatur der Photosphäre liegt die Temperatur der Fackeln um einige 100 Kelvin darüber, sie stellen also eine Überhitzung der höheren Sonnenschichten dar. Sie treten in der Umgebung der Sonnenflecken auf und damit in den gleichen heliographischen Breiten wie diese. Am Sonnenrand sind Fackeln aufgrund des Kontrastes besonders gut zu beobachten. Die Lebensdauer der Fackeln ist größer als die der Sonnenflecken, etwa um einen Faktor drei. Fackeln zeigen auf kleinen Skalen keine zusammenhängenden Strukturen. Vielmehr zeigen sie wie die Granulation der Photosphäre eine körnige Struktur. Es handelt sich bei Fackeln um überhitzte Gaszellen, die mehrere 100 Kilometer groß sein können und mit lokalen starken Magnetfeldern zusammenfallen. Die überwiegende Anzahl der theoretischen Modelle zur Entstehung der Fackeln geht davon aus, dass es sich hierbei um senkrecht in der Photosphäre und der Chromosphäre stehende Röhren mit einem magnetischen Fluss handelt, in dem die Konzentration der magnetischen Feldlinien auch höher sein dürfte. Die lokale Konzentration der Magnetfeldlinien bewirkt die Entstehung eines kühleren Zentrums und von heißen Flanken. Diese heißen Flanken bilden die Innenwände der magnetischen Flusskonzentration. Fackeln sind nach den gängigen Modellen die heißen Innenränder von vertikal aufsteigenden magnetischen Flusskonzentrationen, welche im Bereich von kleinen Skalen auftreten. Hier wird dann auch der Zusammenhang mit den Sonnenflecken ersichtlich, welche durch das Austreten und Eintreten von magnetischen Feldlinien in der Photosphäre entstehen. Diese magnetischen Feldlinien bilden Röhren oder Schläuche mit hoher Flussdichte, welche dann für die Entstehung von Sonnenflecken und Fackeln verantwortlich sein dürften.

4.3 Protuberanzen

Bei Protuberanzen handelt es sich um Materiewolken in der Korona. Sie unterliegen ebenfalls dem 11-jährigen Aktivitätszyklus der Sonne und ihr heliographisches Auftreten entspricht dem der Sonnenflecken. Protuberanzen entstehen durch Plasmakonzentrationen entlang von magnetischen Feldlinien. Das Sonnenplasma ist aufgrund seiner Zusammensetzung aus geladenen Teilchen an die Magnetfeldlinien gebunden und bewegt sich an ihnen entlang. Dies bewirkt auch die beobachtbaren Strukturen der Protuberanzen. Am Sonnenrand erscheinen sie hell und heben sich gegen den dunklen Hintergrund ab. Zu beobachten sind sie entweder bei einer totalen Sonnenfinsternis oder im Licht einer Linie aus der Chromosphäre, etwa H-Alpha. Auf der Sonnenscheibe erscheinen sie wiederum gegenüber der helleren Photosphäre dunkel, in Absorption, und werden als Filamente bezeichnet. Es gibt verschiedene Formen von Protuberanzen. Die **ruhenden Protuberanzen** sind langlebig und können eine Lebensdauer von bis zu einem Jahr erreichen. Sie erreichen in der Regel eine Höhe von bis zu 40.000 km und haben eine Dicke von etwa 7.000 km. Ruhende Protuberanzen sind dünn, lamellenartig und mit einer Länge von 200.000 km recht lang. Sie entstehen hauptsächlich in Fleckengruppen und bei Fackeln. Da die Sonne differenziell rotiert, also in Abhängigkeit von den heliographischen Breiten unterschiedlich schnell, am Sonnenäquator schneller als an ihren Polen, ordnen sie sich immer parallel zum Sonnenäquator aus. Neben den ruhenden Protuberanzen gibt es noch die **aktiven oder eruptiven Protuberanzen**, welche in der Regel mit aktiven Fleckengruppen assoziiert sind. Hierbei gibt es wiederum verschiedene Arten. Bei den sogenannten **Sprays** kommt es zu einem explosionsartigen Aufstieg von Sonnenplasma mit Geschwindigkeiten von etwa 1.000 km/s. Die maximal beobachtete Höhe betrug 1,5 Millionen Kilometer, also etwa viermal soviel wie die gewöhnlich erreichten Höhen von 40.000 km. Die sogenannten **Surges (Spritzer)** erreichen hingegen nur Aufstiegsgeschwindigkeiten von 50 bis 200 km/s und treten immer wieder in aktiven Fleckengruppen auf. Beim sogenannten **koronalen Regen** strömt Materie regenartig zurück. Bei den sogenannten **Loops** folgt die Sonnenmaterie den aus der Photosphäre austretenden Magnetfeldlinien, nimmt also eine bogenartige Struktur an. Die Entstehung der Protuberanzen ist wie im Falle der Sonnenflecken und der Fackeln mit dem Magnetfeld der Sonne verbunden. Sie erscheinen immer an der Grenze zwischen Gebieten von unterschiedlichen magnetischen Polaritäten. In diesen Gebieten laufen die Feldlinien horizontal zueinander. Das Plasma wird durch das Magnetfeld gehalten und dabei zu einer rund einhundertmal größeren Dichte konzentriert als die Dichte der Umgebung. Wenn Magnetfeldlinien unterschiedlicher Polarität zusammenkommen vernichten sie sich (Rekonnexion). Dabei wird explosionsartig Energie frei, welche dann die Auswürfe der Sonnenplasmen antreibt.





Bilder 5, 6, und 7: Protuberanzen. Sonnenplasmen sind in Magnetfeldlinien festgehalten und bewegen sich an ihnen entlang. (Fotos von Ralf Schmidt)

4.4 Sonneneruptionen (Flares und koronale Massenauswürfe)

Sonneneruptionen sind der Ausdruck des höchsten Stadiums der Entwicklung eines aktiven Gebietes. Es handelt sich bei Sonneneruptionen um die stark konzentrierte, explosionsartige Freisetzung von Energie im Bereich eines aktiven Gebietes. Damit verbunden ist der Auswurf von Sonnenmaterie, bei denen Plasmen aus der Chromosphäre bis zu 300 km/s beschleunigt werden. Die Eruption erfasst Bereiche von einigen zehntausend Kilometern und dauert einige Minuten bis zu einer halben Stunde. Gespeist wird diese Energie, welche eine Größenordnung von 10^{16} bis zu 10^{26} Joule (J) erreicht, von der Energie des Sonnenmagnetfeldes. Die eruptive Energieausstrahlung erfolgt in Form von elektromagnetischen Wellen des gesamten elektromagnetischen Spektrums, in Form von mechanischen Stoßwellen und durch Emission von Teilchenstrahlung. Zwei Systeme werden zur Klassifikation von Flares verwendet. In der optischen Klassifikation werden die Flares nach der Quadratfläche ihres Helligkeitsausbruchs in Grad ($^{\circ}$) klassifiziert und nach ihrer Helligkeit. Es wird sozusagen der Glanz der Eruption angegeben. Die Zahlen 1 bis 4 bezeichnen die Fläche des Helligkeitsausbruchs mit zunehmender Größe. Die Buchstaben f (faint), n (normal) und b (bright) die Helligkeit. Die hellsten Flares sind also 4b. Des Weiteren gibt es noch die Röntgenklassifikation. Hier wird der Strahlungsfluss im Röntgenbereich (0,1 – 0,8 nm) in Einheiten von Leistung pro Fläche (W/m^2) angegeben. Konkret werden diese Einheiten in Zehnerpotenzen angegeben, welche mit großen Buchstaben bezeichnet werden: A, B, C, M und X. A: $10^{-8} \text{ W}/\text{m}^2$, B: $10^{-7} \text{ W}/\text{m}^2$, C: $10^{-6} \text{ W}/\text{m}^2$, M: $10^{-5} \text{ W}/\text{m}^2$ und X: $10^{-6} \text{ W}/\text{m}^2$. Ein M8-Flare hat dann im Bereich von 0,1 bis 0,8 nm einen maximalen Strahlungsfluss von $8 \cdot 10^{-5} \text{ W}/\text{m}^2$.

Eruptionen sind mit folgenden Erscheinungen verbunden:

- kurzwellige Strahlung unterhalb einer Wellenlänge von 200 nm: Sie sind in der Größenordnung wie die Gesamtstrahlung der Sonne in diesem Bereich.
- Röntgenstrahlung: Erhöhte Röntgenstrahlen, welche in der D-Schicht der Ionosphäre der Erde eine verstärkte Ionisation verursacht, was in Folge zu Störungen des Funkverkehrs führen kann.
- Teilchenstrahlung: Teilchen werden bei einer Sonneneruption mit Geschwindigkeiten von 1.000 bis 2000 km/s ausgestoßen, erreichen nach einem Tag die Erde und verursachen dort magnetische Stürme und Polarlichter (grüne und rote Polarlichter, hervorgerufen von den entsprechenden Übergängen in Sauerstoffatomen der Erdatmosphäre).
- Radiostrahlung: Hierbei handelt es sich um Radiostrahlung im Meter-Bereich.
- Kosmische Strahlung: Hierbei handelt es sich um die solare Komponente der Kosmischen Strahlung, welche ebenso wie die anderen Komponenten der Kosmischen Strahlung (galaktische und extra-galaktische) beim Zusammenstoß mit Atomen der oberen Erdatmosphäre Sekundärteilchen und Höhenschauer erzeugt.

Neben den Flares gibt es noch koronale Massenauswürfe in einer Größenordnung von 10^{12} bis 10^{13} kg. Hierbei verlässt Materie die Sonne mit Geschwindigkeiten von bis zu 2.000 km/s. Die eruptiven Flares dürfen von diesen koronalen Massenauswürfen verursacht werden. Die magnetischen Feldlinien sind während einer eruptiven Phase von koronalen Massenauswürfen offen. Danach schließen sie sich wieder, es kommt zur sogenannten magnetischen Rekonnexion und im Ergebnis zu einem eruptiven Flare.

Bei der sogenannten magnetischen Rekonnexion kommen Magnetfeldlinien unterschiedlicher Polarität zusammen und vernichten sich. Dabei wird explosionsartig Energie frei, welche dann die Auswürfe der Sonnenplasmen antreibt. Insgesamt dürfte die magnetische Rekonnexion die Ursache für Sonneneruptionen sein, so dass folgende Voraussetzungen klassifiziert werden können:

- α : ein einzelner dominierender Fleck, in der Regel verbunden mit einer Plage entgegengesetzter Polarität.
- β : Sonnenfleckpaar mit entgegengesetzten magnetischen Polaritäten.

- γ : komplexe Gruppe mit unregelmäßiger Verteilung der magnetischen Polaritäten.
- δ : Umbrae mit entgegengesetzten magnetischen Polaritäten in einer einzigen Penumbra.

In der d-Konfiguration treten Eruptionen am häufigsten auf, da hier zwei Pole mit starken vertikalen magnetischen Feldern nahe beieinander sind. Folgende Kriterien können für das Auftreten von Sonneneruptionen angegeben werden:

- große δ -Flecken,
- Umbrae mit großen Elongationen (Auslenkungen),
- hohe Scherung im transversalen Feld oder einen starken Gradienten (Anstieg) im longitudinalen Feld,
- große Sonnenflecken haben immer starke Flares.

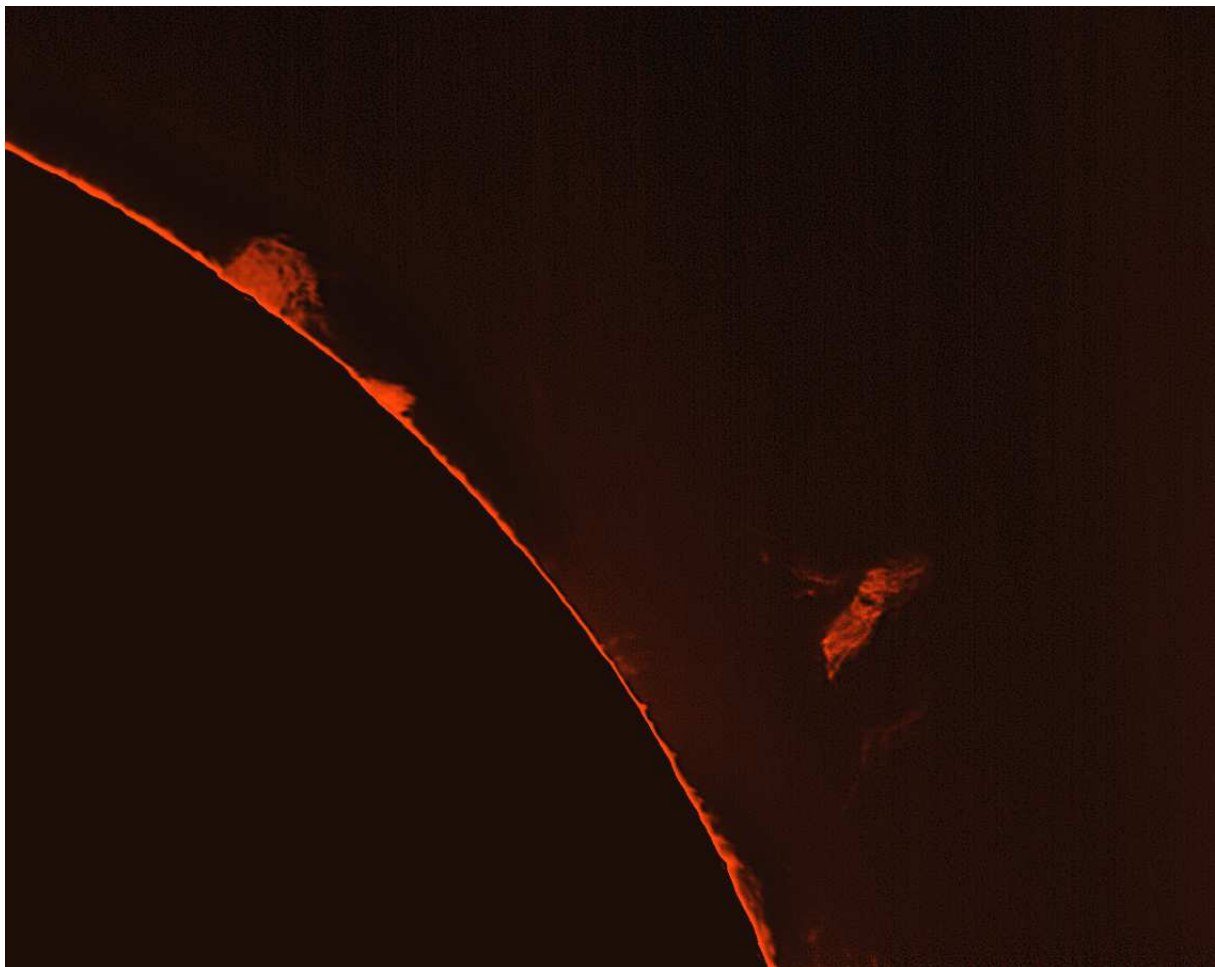


Bild 8: Sonneneruptionen mit dem Ausstoß von Sonnenmaterie (Bild: Ralf Schmidt)

4.5 Die Radio- und Röntgenstrahlung der Sonne

Die Sonne strahlt elektromagnetische Strahlung im gesamten Spektrum dieser Strahlung ab. Neben der Strahlung im optischen Bereich soll hier die Radiostrahlung und Röntgenstrahlung der Sonne hervorgehoben werden.

Im Falle der Radiostrahlung der Sonne muss zwischen einer langsam variablen Komponenten dieser Strahlung und Radiostrahlungsausbrüchen (Bursts) unterschieden werden. Bei der ersteren Komponente dürfte es sich um thermische Strahlung aus der Korona-Kondensation handeln, deren

Temperatur etwa 100 Millionen Kelvin beträgt. Sie kommt hauptsächlich aus diskreten Bereichen der Sonnenatmosphäre, in denen sich auch Fleckengebiete befinden. Der Strahlungsstrom dieser Komponente der Radiostrahlung zeigt eine enge Korrelation mit der Fleckenrelativzahl. Ihre Wellenlänge liegt bei 1 bis 100 cm, wobei ihr Maximum bei 15 cm liegt. Bei den Radiostrahlungsausbrüchen liegt die Wellenlänge der ausgesandten Radiostrahlung bei 1 cm bis 15 m und deckt damit einen größeren Bereich des Radiospektrums ab. Im Zentimeter-Bereich steigt die Intensität der Radiostrahlung um das 20- bis 40-fache, im Meter-Bereich um das 100.000-fache an. Es gibt unterschiedliche Arten von Radiobursts und unterschiedliche Ursachen. So sind Radiobursts in der Regel nicht thermischer Art, sondern werden durch Plasmaschwingungen und schnell bewegte Elektronen in einem Magnetfeld verursacht. Im Falle von Plasmaschwingungen bewegen sich die negativ geladenen Elektronen gegenüber den positiv geladenen Atomkernen bzw. Atomrümpfen (Ionen). Dabei wird nicht-thermische Radiostrahlung erzeugt. Je höher die Elektronendichte ist, umso höher ist auch die Frequenz der Plasmaschwingungen. Von innen nach außen nimmt die Elektronendichte allerdings ab und damit auch die Plasmaschwingungen. Im anderen Fall bewegen sich Elektronen entlang von Magnetfeldlinien bzw. sie werden beschleunigt. Die Elektronen bewegen sich spiralförmig um die Magnetfeldlinien herum. In diesem Fall geben die Elektronen nicht-thermische Synchrotronstrahlung im Radiobereich ab. Es gibt insgesamt vier Typen von Radiobursts und einen sogenannten Noise Storm im Meter-Bereich.

Die Röntgenstrahlung wird von der sehr heißen Korona abgestrahlt, welche eine Temperatur von etwa 100 Millionen Kelvin hat. Es handelt sich also um thermische Strahlung. Der Faktor der Variation von ultravioletter Sonnenstrahlung während eines elfjährigen Zyklus beträgt etwa zwei, im Falle der Röntgenstrahlung der Sonne beträgt der Faktor 100 und zeigt damit eine sehr deutliche Korrelation mit der Sonnenaktivität. Bereits im Unterkapitel zum Aufbau der Sonnenatmosphäre wurde darauf hingewiesen, dass die Struktur der Sonnenkorona ebenfalls eine Korrelation mit der Sonnenaktivität zeigt. Die Energie der Röntgenstrahlung wird in Kilo-Elektronenvolt (keV) angegeben, während die Energie von Gamma-Strahlung bereits im Bereich von Mega-Elektronenvolt (MeV) liegt. Ein Elektronenvolt ist die Energie, die ein Elektron mit der Elementarladung von $1,602 \cdot 10^{-19}$ Coulomb (C) in einem elektrischen Feld von einem Volt (V) erfährt. Ein Elektronenvolt entspricht einer Energie von $1,602 \cdot 10^{-19}$ J und ein keV einer von $1,602 \cdot 10^{-16}$ J. Bei einem Energiebereich von 10 bis 100 keV wird von harter Röntgenstrahlung und in einem Energiebereich von 1 bis 10 keV von weicher Röntgenstrahlung gesprochen. Im Falle von Flares wird in der impulsiven Anfangsphase zunächst harte Röntgenstrahlung freigesetzt, während weiche Röntgenstrahlung zeitverzögert, meist um einige Minuten, am Maximum des Flares emittiert wird. Für die Entstehung von Röntgenstrahlung kommen folgende Mechanismen in Frage:

- thermische Bremsstrahlung: Wasserstoffkerne (Protonen) ziehen freie Elektronen an, die dabei ihre Geschwindigkeit ändern bzw. abgebremst werden und aufgrund ihrer hohen thermischen Ausgangsgeschwindigkeit Röntgenstrahlung emittieren. Bei der thermischen Bremsstrahlung besitzen die Teilchen des emittierenden Plasmas eine definierte Geschwindigkeit und ihre Verteilung genügt der sogenannten Maxwell-Verteilung, welche die energetische Verteilung in Abhängigkeit von der Temperatur angibt.
- Nicht-thermische Bremsstrahlung: Elektronen mit sehr hoher Energie, welche nicht der Maxwell-Verteilung genügen.
- Synchrotronstrahlung: Elektronen mit sehr hohen Geschwindigkeiten werden entlang von Magnetfeldlinien beschleunigt und strahlen dabei nicht-thermische Synchrotronstrahlung im Röntgenbereich ab. Dabei werden diese elektromagnetischen Wellen von hoher Energie tangential zur Bewegungsrichtung der Elektronen emittiert.

5.0 Solar-terrestrische Beziehungen

Die Sonne ist der Stern, welcher das Leben auf der Erde erst ermöglicht. Ohne die Sonne hätte sich auf der Erde kein Leben entwickeln können. Auch viele von den Menschen genutzte Energiequellen gehen letztendlich auf Sonnenenergie zurück. Nur die Kernenergie und die Energie aufgrund der Nutzung der Gezeiten (Gezeitenkraftwerke) gehen nicht auf Sonnenenergie zurück. Die Erde empfängt von der Sonne eine Leistung von etwa $1,8 \cdot 10^{17}$ W. Ein Großteil davon, etwa 10^{15} W wird in die kinetische Energie der Luftbewegungen umgesetzt. Auf der Erde kommt durchschnittlich ein Strahlungsfluss von 1.367 W/m² an. Dieser Wert, beruhend auf den mittleren Abstand von Erde und Sonne, wird als Solarkonstante bezeichnet. Streng genommen ist dies keine Konstante, da der Wert aufgrund der Variation der Entfernung Erde – Sonne ebenfalls variiert und auch der Zustand der Atmosphäre (z.B. die Bewölkung) Einfluss hat. Die Gravitation der Sonne hat ebenfalls Einfluss auf die Erde. Zunächst zwingt sie die Erde auf eine fast kreisförmige Bahn und liefert damit einen Beitrag zu einem stabilen Klima auf der Erde. Auch zu den Gezeiten auf der Erde liefert die Sonne einen Beitrag. Zwar wirkt die Gravitation des Mondes aufgrund seiner relativen Nähe zur Erde wesentlich stärker, doch beeinflussen die Stellung des Mondes und der Sonne zueinander die Intensität der Gezeiten. Wirken ihre Kräfte zusammen, dann entsteht eine sogenannte und im durchschnitt höhere Springtide (Springflut). Wirken sie gegeneinander, da Mond und Sonne in einem Winkel von 90° zueinanderstehen, entsteht eine sogenannte und im durchschnitt niedrigere Nipptide (Nippflut).

Der solare Strahlungsfluss (die solare Irradianz) unterliegt leichten Schwankungen. Änderungen der Irradianz gehen auf Sonnenflecken, Fackeln, von der Supergranulation hervorgerufene Netzwerke, Einflüsse von Magnetfeldern auf den konvektiven Wärmefluss und auch auf nicht-magnetische Einflüsse zurück. So kann eine Änderung der Sonnenstrahlung um 0,1 Prozent zu einer Temperaturänderung auf der Erde um $0,2^\circ$ K bzw. $0,2^\circ$ C führen. Zur Zeit eines Aktivitätsmaximums ist die Sonne etwa um 0,1 Prozent heller. Seit 1990 nimmt die Sonnenaktivität insgesamt zu, so dass ein kleiner Teil des Temperaturanstiegs auf der Erde auch darauf zurückgeführt werden kann. Neben dem 11-jährigen Aktivitätszyklus der Sonne, in dessen Maximum besonders viele Sonnenflecken auftreten, dürfte es noch einen 90-jährigen Gleißberg-Zyklus (nach dem Astronomen Wolfgang Gleißberg) geben sowie längere Phasen mit besonders geringer oder hoher Sonnenaktivität. So konnten in den Phasen mit besonders geringer Sonnenaktivität für mehrere Jahrzehnte keine Sonnenflecken beobachtet werden. Diese Phasen waren:

- Maunder-Minimum (1645 – 1715)
- Spörer-Minimum (1460 – 1550)
- Mittelalterliches Maximum (1100 – 1250)
- Römisches Maximum (20 – 80)

Diese Phasen scheinen auch Einfluss auf das Erdklima zu haben. So kam es während des Maunder-Minimums zu einer kleinen Eiszeit in Europa. Während des Mittelalterlichen Maximums gab es eine ungewöhnlich warme Klimaperiode auf der Erde, bei der z.B. Grönland eisfrei und damit tatsächlich eine grüne Insel war. Es scheint einen Zusammenhang zwischen dem Klima auf der Erde und der Sonnenaktivität zu geben. Eine höhere Sonnenaktivität dürfte im Ergebnis zu einem wärmeren Klima auf der Erde bzw. zu höheren Erdtemperaturen führen. Trotz der Sonnenflecken, welche ja um etwa 1.000 K kühler sind, dürfte die Strahlungsleistung der Sonne bei einem Aktivitätsmaximum höher sein. Denn das von den Sonnenflecken hervorgerufene Strahlungsdefizit wird durch die erhöhte Abstrahlung in den hellen und heißen Fackelgebieten überkompensiert.

Der 11-jährige Aktivitätszyklus der Sonne spiegelt sich auch in der Struktur der Jahresringe von Bäumen wider. Auch die besonderen Phasen der Sonnenaktivität, etwa das Maunder-Minimum, spiegeln sich dort wider. Des Weiteren gibt es noch einen Zusammenhang zwischen der Konzentration von radioaktivem Kohlenstoff-14 in Baumringen und der Sonnenaktivität. Die Sonnenaktivität ist mit dem Magnetfeld der Sonne verknüpft.

Das interplanetare Magnetfeld ist bei höherer Sonnenaktivität dichter als bei niedrigerer Aktivität. In Folge können weniger Teilchen der Kosmischen Strahlung die Erde erreichen. Im Ergebnis entsteht das C-14 aus einem Zusammenstoß von einem Neutron mit einem Stickstoff-14-Atom in der Erdatmosphäre. Das Neutron wiederum entsteht als Sekundärteilchen aus einer Wechselwirkung der Kosmischen Strahlung mit der Erdatmosphäre. Die Pflanzen nehmen unter anderem auch das radioaktive C-14 auf. Bei höherer Sonnenaktivität entsteht im Ergebnis weniger C-14 als bei niedrigerer Aktivität und das lässt sich messen. So finden wir in der Pflanzenwelt hinweise auf den Aktivitätszyklus der Sonne.

Der aus geladenen Teilchen (Protonen, Alpha-Teilchen, Kerne schwererer Elemente und Elektronen) bestehende Sonnenwind wechselwirkt sowohl mit dem Erdmagnetfeld als auch mit der Atmosphäre der Erde. Die Magnetosphäre der Erde wird auf der sonnenzugewandten Seite der Erde gestaucht, während sich auf der sonnenabgewandten Seite ein Schweif bildet. Der Sonnenwind kann in der Erdatmosphäre Ströme erzeugen. Diese können wiederum Überspannungen in Überlandleitungen induzieren, Transformatoren zerstören und damit die Stromversorgung in den betroffenen Gebieten lahmlegen. Ein anderes Phänomen wurde bereits angesprochen. Bei Flares wird Röntgenstrahlung emittiert, welche die Ionendichte in der Erdatmosphäre erhöht. Es kann dabei zu plötzlich auftretenden Störungen der Ionosphäre kommen. In Folge können Funksignale in der D-Schicht absorbiert und damit der Funkverkehr gestört werden. Auf der anderen Seite werden bei einem Aktivitätsmaximum höhere Frequenzen von Radiostrahlung reflektiert und damit deren Reichweite erhöht. Selbst die Störung von Computern ist durch die energiereichen Teilchen des Sonnenwindes möglich. So kommt es zum Effekt der sogenannten Bit-Umkehr und damit zu falschen Befehlen. Durch die erhöhte kurzwellige Strahlung wird die obere Erdatmosphäre erhitzt und dehnt sich aus. In Folge können erdnahe Satelliten abgebremst werden und abstürzen. Intensive Teilchenstrahlung ist auch gefährlich für Lebewesen, insbesondere für Raumfahrer, so dass auf das sogenannte Weltraumwetter, unter dem die oberen Ereignisse dieses Abschnitts zusammengefasst werden, besonders geachtet werden muss. Daher wird das Weltraumwetter beobachtet und versucht, Vorhersagen über dessen Entwicklung zu machen.

Besonders eindrucksvoll ist noch eine andere Wechselwirkung des Sonnenwindes mit der Erdatmosphäre, die Polarlichter. Sie entstehen, wenn die elektrisch geladenen Teilchen des Sonnenwindes vom Magnetfeld der Erde eingefangen und sie entlang der Magnetfeldlinien auf die obere Erdatmosphäre treffen. Die hochenergetischen Teilchen ionisieren in Folge Stickstoff- und Sauerstoffatome der Erde. Nach kurzer Zeit erfolgt jedoch wieder die Rekombination, d.h. die Elektronen werden wieder von den Stickstoff- und Sauerstoffionen eingefangen. Dabei wird Licht in Form von verschiedenen Wellenlängen bzw. Frequenzen bzw. Farben emittiert. So entsteht grünes und rotes Polarlicht durch Sauerstoff, blaues und violettes Licht durch Stickstoff. Polarlichter leuchten nicht nur im optischen Bereich, sondern können auch im unsichtbaren langwelligen und kurzwelligen Bereich, etwa im ultravioletten und Röntgenbereich, strahlen. Da die Magnetfeldlinien der Erde an den jeweiligen Erdpolen eintreten, die geladenen Teilchen sich entsprechend dort entlang bewegen, kommen Polarlichter hauptsächlich in den Polargebieten und höheren geographischen Breiten vor. Da der Sonnenwind mit der Aktivität der Sonne korreliert ist, kommen Polarlichter auch besonders bei einem Aktivitätsmaximum der Sonne vor.

6.0 Die weitere Entwicklung der Sonne und ihr Ende

Die Sonne befindet sich in etwa in der Hälfte ihrer Lebenszeit als Hauptreihenstern, wo sie Wasserstoff in Helium fusioniert. Der Begriff Hauptreihe markiert alle Sterne, die ihre Energie durch Kernfusion von Wasserstoff in Helium erzeugen. Sterne werden nach ihrer Farbe bzw. ihrer Oberflächentemperatur und dem Aussehen ihres Spektrums in Spektralklassen eingeteilt. Diese werden mit Buchstaben gekennzeichnet. Die wichtigsten Spektralklassen sind: O, B, A, F, G, K, und M.



Bild 9: Die Spektralklassen

Die Leuchtkraft eines Sterns hängt von seiner Masse ab. Je mehr Masse ein Stern hat, desto größer ist seine Energieproduktion und desto kleiner ist seine Lebenszeit bzw. Verweilzeit als Hauptreihenstern. Die Spektralklassen sind von O bis M nach abnehmender Masse und Temperatur der Sterne geordnet. O-Sterne sind bläuliche Sterne mit Oberflächentemperaturen von 30.000 bis 50.000 Kelvin (K) und haben typischerweise 60 Sonnenmassen. M-Sterne hingegen sind rötliche Sterne mit Oberflächentemperaturen von 2.000 bis 3.350 K und haben typischerweise 0,3 Sonnenmassen. Unsere Sonne gehört dem Spektraltyp G an und hat eine Oberflächentemperatur von 5.800 K. O-Sterne haben eine Lebensdauer von mehreren Millionen Jahren, während die der M-Sterne zirka 100 Milliarden Jahre beträgt. G-Sterne wie unsere Sonne haben eine Lebensdauer von rund 10 Milliarden Jahren.

Sterne können in einem Diagramm eingetragen werden. Auf der Abszisse (waagerechte Achse, x-Achse) stehen die Spektralklassen bzw. die Farben bzw. die Temperaturen und auf der Ordinate (senkrechte Achse, y-Achse) die absolute Helligkeiten. Im Falle, dass Spektralklasse und Helligkeit gegeneinander aufgetragen werden, wird von einem Herzprung-Russell-Diagramm gesprochen. Alternativ kann statt der Spektralklasse auch die Farbe gegen die Helligkeit aufgetragen werden. In diesem Fall wird von einem Farben-Helligkeits-Diagramm gesprochen. Jeder Stern hat eine bestimmte Oberflächentemperatur bzw. Spektralklasse und eine bestimmte absolute Helligkeit und kann als Punkt in dieses Diagramm eingetragen werden. Im Falle der Sonne ist es der Spektraltyp G2 und eine absolute Helligkeit von $4,^{m}84$. Sterne der Spektralklassen O bis M, welche Wasserstoff in Helium fusionieren, bilden in dem Diagramm eine Reihe, welche links oben anfängt und rechts unten aufhört. Diese Reihe wird Hauptreihe genannt. Die Sonne befindet sich als Punkt etwa in der Mitte dieser Reihe.

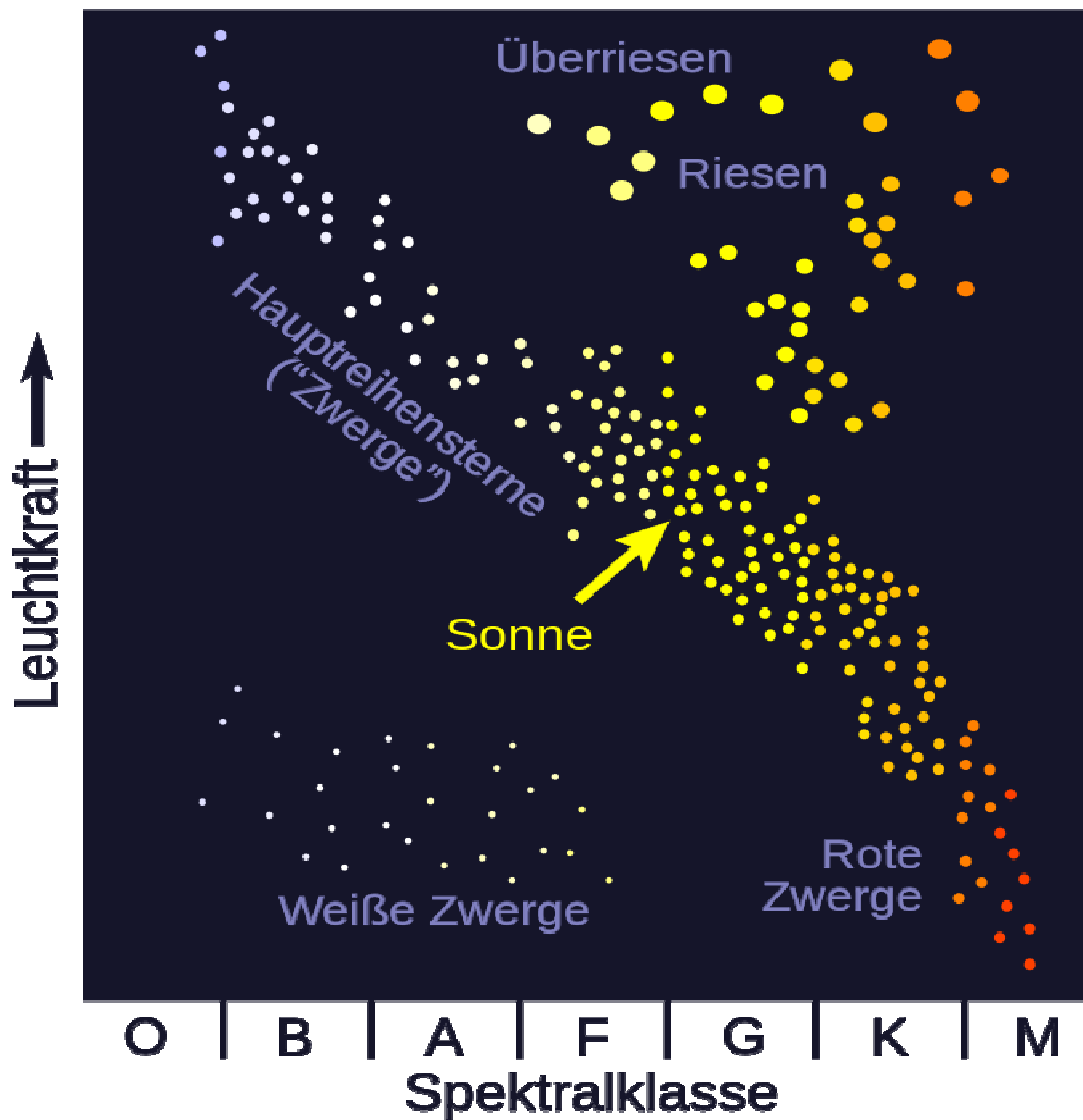


Bild 10: Das Hertzsprung-Russell-Diagramm / Quelle: wikipedia

Hauptreihensterne sind im Prinzip reguläre Sterne mit unterschiedlicher Masse, Temperatur und Lebensdauer. Doch erzeugen sie alle ihre Energie durch Kernfusion von Wasserstoff in Helium. Insgesamt wird sich die Sonne etwa zehn Milliarden Jahre auf der Hauptreihe befinden, wovon sie schon zirka die Hälfte der Zeit hinter sich hat. Allerdings entwickelt sich dabei die Strahlungskraft der Sonne. Seit ihrer Entstehung bis heute hat ihre Leuchtkraft um zirka 20 – 30 Prozent zugenommen und wird weiter zunehmen. In zirka 100 Millionen Jahren dürfte das Leben auf der Erde aufgrund der noch stärkeren Leuchtkraft der Sonne unmöglich werden. Bei ihrer Entstehung betrug die Sonnenleuchtkraft $0,7 L_{\odot}$. Heute hat sie den Definitionswert $1 L_{\odot}$. Am Ende ihres Hauptreihenstadiums wird die Sonnenleuchtkraft bei $2,2L_{\odot}$ liegen. Ihr Radius entwickelte bzw. entwickelt sich in diesem Zeitraum von $0,9$ bis $1,6 R_{\odot}$. Ursache für den Anstieg von Leuchtkraft und Radius ist die Zunahme der Heliumkonzentration im Sonnenkern aufgrund der Kernfusion. Die Kernfusionsrate von H zu He nimmt aus diesem Grunde ab, so dass die Temperatur im Kern sinkt und der Gravitationsdruck nicht mehr ausgeglichen werden kann. Der Kern kontrahiert, Druck und Temperatur steigen wieder und im Ergebnis nimmt die Fusionsrate zu. Es wird mehr Energie erzeugt und die Leuchtkraft der Sonne steigt. Da die Schichten um den Sonnenkern stärker erhitzt werden, dehnen sie sich aus und damit erhöht sich auch der Radius der Sonne.

In zirka 5 Milliarden Jahren wird sich der Kern mit Helium angereichert haben, so dass sich die Zone des Wasserstoffbrennens nach außen schiebt. In Folge erhitzen sich die darüber liegenden Schichten noch mehr und dehnen sich massiv aus. Da die Leuchtkraft der Sonne gleich bleibt, sinkt aufgrund der größeren Sonnenoberfläche ihre Oberflächentemperatur. Die Sonne ist zu einem Roten Riesen geworden. Der Heliumkern kontrahiert so weit, bis eine Kerntemperatur von 100 Millionen Kelvin erreicht wird. Dann fusioniert Helium zu Kohlenstoff. Ein Teil des entstandenen Kohlenstoffs kann mit Helium noch weiter zu Sauerstoff fusionieren.

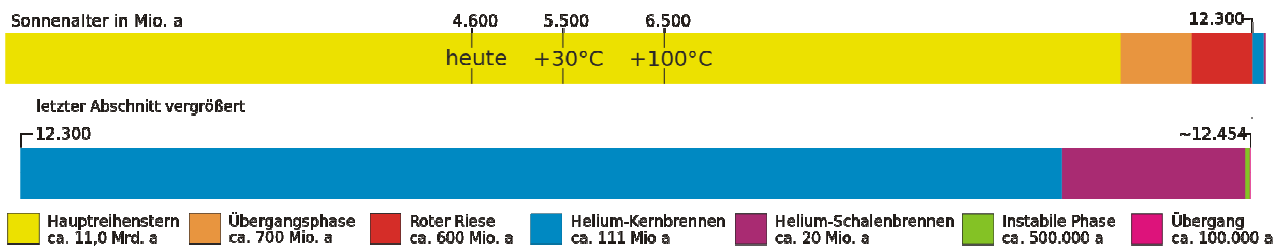
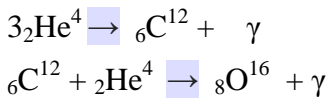


Bild 11: Die Entwicklung der Sonne / Quelle: Wikipedia

In diesem Stadium ist die Sonne kein Hauptreihenstern mehr. Das Riesenstadium der Sonne wird zirka 600 Millionen Jahre andauern. Zunehmend wird auch der Wasserstoff in den schalenförmigen Brennzonen um den Heliumkern und das Helium im Kern selbst aufgebraucht. In Folge wird der Stern instabil. Er kann mehrere Male kontrahieren und sich wieder aufblähen. Ein Stern von der Masse der Sonne kann letztendlich nicht genügend Druck aufbauen, um noch weitere Kernfusionen, etwa von Kohlenstoff und Sauerstoff zu Elementen mit noch höherer Massenzahl zu starten. Am Ende wird die äußere Sonnenhülle abgestoßen und es bildet sich ein planetarischer Nebel. Übrig bleibt ein sogenannter Weißer Zwerg. Dieser hat nur noch einen Durchmesser von mehreren 1.000 Kilometern. Die Stabilität dieses Weißen Zwerges ist quantenmechanischer Natur und beruht auf ein entartetes Elektronengas. Aufgrund der Gesetze der Quantenmechanik können Elektronen nur bestimmte Quantenzustände besetzen, jedoch kann jeder Quantenzustand nur von einem Elektron besetzt werden. Diese Eigenschaft der Elektronen erzeugt einen Druck, welcher der Gravitation entgegenwirkt und damit zu einem neuen Gleichgewicht führt. Diese Eigenschaften machen sich erst bei hohen Drücken bzw. bei einer stark komprimierten Materie bemerkbar. Wenn aufgrund der Rahmenbedingungen entsprechende Eigenschaften bei den Elektronen auftreten, wird von einem entarteten Elektronengas gesprochen. Der Weiße Zwerg kühlt langsam aus und wird dann zu einem sogenannten Schwarzen Zwerg.

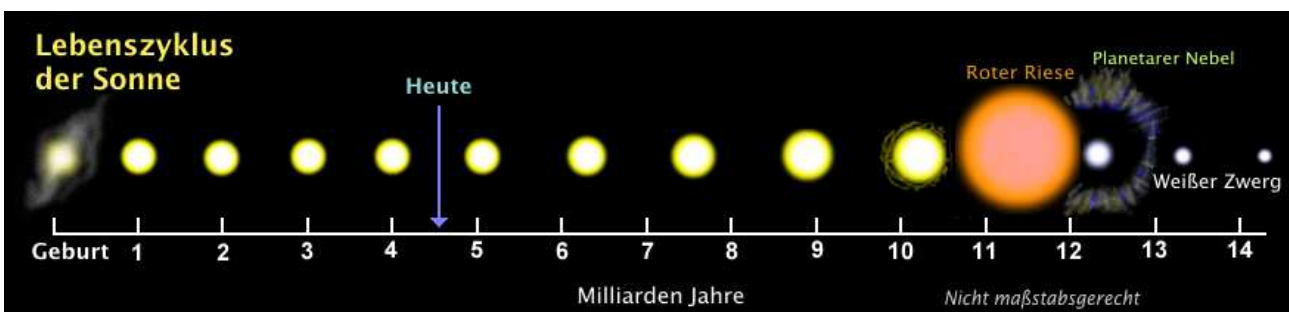


Bild 12: Der Lebenszyklus der Sonne / Quelle: Wikipedia

7.0 Schlusswort

Diese Abhandlung über die Sonne stellt eine Literaturrecherche dar. Die hierfür verwendete Literatur ist im Literaturverzeichnis angegeben und eignet sich auch für die weitere Vertiefung des Themas. Die Sonne ist für uns ein besonderer Stern. Zunächst einmal gäbe es ohne die Sonne kein Leben auf der Erde und ich könnte damit im Ergebnis auch nicht diese Abhandlung schreiben. Des Weiteren ist die Sonne der einzige Stern, auf dem wir Einzelheiten detailliert erforschen können. Neben der erdgebundenen Beobachtung erlangt mittlerweile auch die Erforschung der Sonne durch Satelliten und Raumsonden eine immer größere Bedeutung. Die Sonne ist ein gewöhnlicher Hauptreihenstern. Die Modelle zur Entstehung und Entwicklung der Sterne können wir an ihr detailliert studieren. Die Sonne dient auch als Maßstab zur Beschreibung der Sterne, indem wir ihre Massen, Radien und Leuchtkräfte in Sonnenmassen (M_{\odot}), Sonnenradien (R_{\odot}) und Sonnenleuchtkräfte (L_{\odot}) angeben. Sterne entwickeln sich. Sie werden geboren, verbringen eine bestimmte Zeit auf der Hauptreihe und sterben dann wieder. Die Sonne wurde vor zirka fünf Milliarden Jahren geboren und sie hat etwa die Hälfte ihres Lebens hinter sich. Sie ist bereits ein Stern der dritten Generation. Sie selbst verdankt ihre Existenz einem sterbenden, sehr viel massereicheren Stern, welcher als Supernova endete und die Entstehung der Sonne triggerte. Mit der Sternentwicklung ist Entstehung von Planeten eng verbunden, so dass es ohne unsere Sonne auch unser Planetensystem und damit die Erde nicht gäbe. Die Wechselwirkungen zwischen Erde und Sonne sind vielseitig. Die Beobachtung des Weltraumwetters gehört heute zum Alltag der Wissenschaft und Forschung. Das Weltraumwetter wird durch den Sonnenwind, einen Strom von geladenen Teilchen hervorgerufen und hat auch Einfluss auf unserer Technologie, indem es Störungen verursachen kann. Eines Tages wird die Entwicklung der Sonne allerdings dem Leben auf der Erde ein Ende bereiten, da die Sonnenleuchtkraft aufgrund innerer Prozesse zunehmen wird. Unsere Existenz ist also eng mit der Entwicklung der Sonne verknüpft. Doch noch existieren wir, können Wissenschaft und Forschung betreiben. Des Weiteren konnte ich aus diesem Grund eine Abhandlung schreiben, wobei ich wieder wertvolle Hilfe hatte. Für das Korrekturlesen möchte ich Stefan Antheck wieder sehr danken. Des Weiteren möchte ich Ralf Schmidt sehr danken, einem professionellen Astrofotographen, welcher mir diverse wertvolle Bilder für diese Abhandlung zur Verfügung stellte.

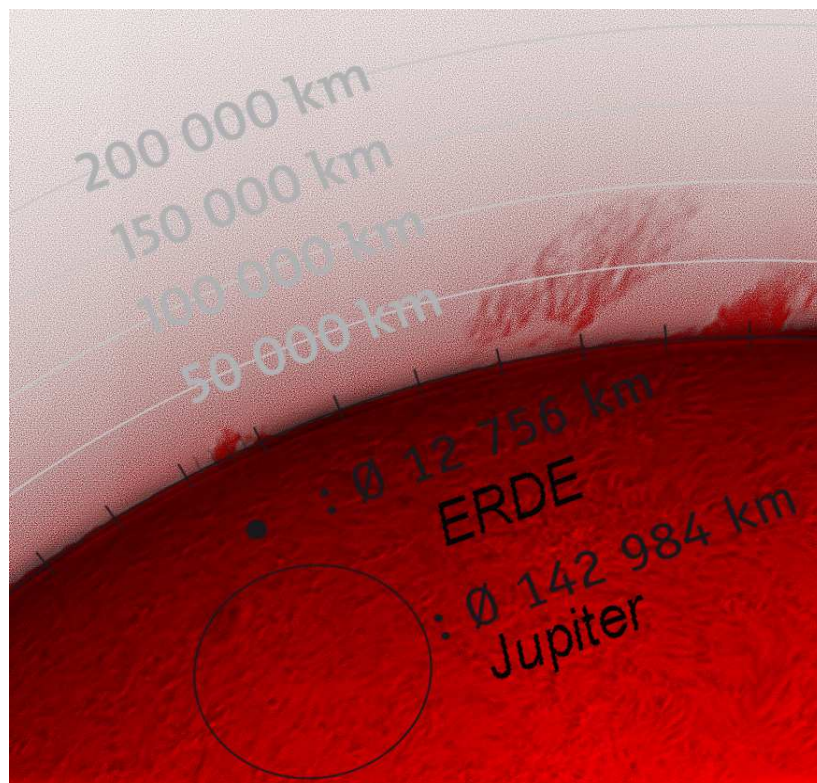


Bild 13: Größenverhältnisse zum Sonnenradius (von Ralf Schmidt)



Bild 14: Die Photosphäre der Sonne. Deutlich ist die körnige Struktur, die Granulation erkennbar. (Foto von Ralf Schmidt)

8.0 Literatur-, Quellen- und Bilderverzeichnis

Folgende Literatur fand bei der Erstellung dieser Abhandlung Verwendung und kann zur Vertiefung der Thematik empfohlen werden:

- 1) Arnold Hanslmeier, Einführung in die Astronomie und Astrophysik, 2013.
- 2) A. Weigert, H.J. Wendker, L. Wisotzki, Astronomie und Astrophysik, 2009.
- 3) Mathias Scholz, Kleines Lehrbuch der Astronomie und Astrophysik
Band 13 – Die aktive Sonne, 2009.
- 4) Klaus Lindner, Taschenbuch der Astronomie, 1993

Bilderverzeichnis:

Titelbild: Raumsonde Soho (ESA/NASA)

Bild 1: wikipedia

Bild 2: <http://www.fakko.de/school/sonne/aufbau.htm>

Bild 3: Ralf Schmidt

Bild 4: Ralf Schmidt

Bild 5: Ralf Schmidt

Bild 6: Ralf Schmidt

Bild 7: Ralf Schmidt

Bild 8: Ralf Schmidt

Bild 9: <http://www.gym-vaterstetten.de/faecher/astro/Sterne/Sterne.HTM>

Bild 10: Wikipedia

Bild 11: Wikipedia

Bild 12: Wikipedia

Bild 13: Ralf Schmidt

Bild 14: Ralf Schmidt