

## Vortrag: Unsere Sonne – Hurtigruten Polarlicht + Sterne GRP 103

Wer glaubt schon, dass wenn er an einem warmen Sommertag in die Sonne blinzelt, dieser dem bloßen Auge ruhig Licht und Wärme abstrahlenden Stern in Wirklichkeit ein brodelndes "Inferno" ist ungeheuren Ausmaßes ist. Dabei ist die Sonne ein normaler Fixstern, wie alle anderen Sterne, die wir am nächtlichen Himmel beobachten können. Sie ist – im Vergleich zu vielen anderen Sternen – weder besonders groß oder außergewöhnlich heiß oder kühl.

Sonne und Sonnensystem (Planeten) sind zur gleichen Zeit – vor ungefähr 4.6 Milliarden Jahren aus einer interstellaren Gas- und Staubwolke entstanden. Die Sonne ist im Sonnensystem der einzige Körper, der selbst Licht und Wärme abstrahlt. Planeten reflektieren nur das von der Sonne empfangene Licht. Die Sonne beinhaltet etwa 99.8% aller Masse des gesamten Sonnensystems.

Ihr Alter kennt man aus Untersuchungen ältester Mineralien von der Erdoberfläche und von Meteoriten über die Halbwertszeitbestimmung radioaktiver Elemente. Dass die Sonne über mehrere Milliarden Jahre ihre Energieabstrahlung nahezu konstant gehalten hat, schließt man aus 3.5 Milliarden Jahre alte Versteinerungen von Blaualgen, die damals wie heute gleiche Umweltbedingungen (flüssiges Wasser) zum Leben benötigten.

Und dass die Sonne zumindest in den letzten 5.000 Jahren keine Änderungen ihres Durchmessers und damit ihrer Leuchtkraft erlitten hat, weiß man definitiv aus Beschreibungen historischer totaler Sonnenfinsternisse, die nicht hätten beobachtet werden können, wenn der Sonnendurchmesser größeren Schwankungen unterlegen gewesen wäre.

Die Sonne ist eine gigantische Gaskugel ohne festen Kern mit einem Durchmesser von 1.4 Millionen Kilometer. Unsere Erde kreist in einem mittleren Abstand von 149 Millionen Kilometer um das Zentralgestirn. Die Stabilität dieser Gaskugel wird dadurch erreicht, dass dem Strahlungsdruck der aus dem Kern der Sonne nach außen gerichtet ist, die Gravitationskraft, die durch die Rotation der Sonne entsteht und die nach innen wirkt, sich genau die Waage hält.

Um das Volumen der Sonne zu verdeutlichen müsste man 1.300.000 Erdkugeln zusammenpacken, dann hätte man einen Körper von Sonnengröße.

Die Sonne rotiert – wie die Erde – um eine Rotationsachse. Die Rotationsgeschwindigkeit ist – da die Sonne kein starrer Körper ist – unterschiedlich (differentiell) zwischen Äquator und Sonnenpol. Am Äquator beträgt die Periode knapp 26 Tage, an den Polen ca. 35 Tage.

Die Sonne besitzt ein sehr starkes Magnetfeld, welches zusammen mit der Sonne ebenfalls differentiell rotiert. Magnetfelder und Magnetfeldlinien sind der Schlüssel zu allen beobachtbaren Sonnenphänomenen aber sie sind bis heute - im Detail - wenig verstanden und daher zur Zeit Gegenstand intensiver Erforschung (*Stichwort*: Magnetohydrodynamik).

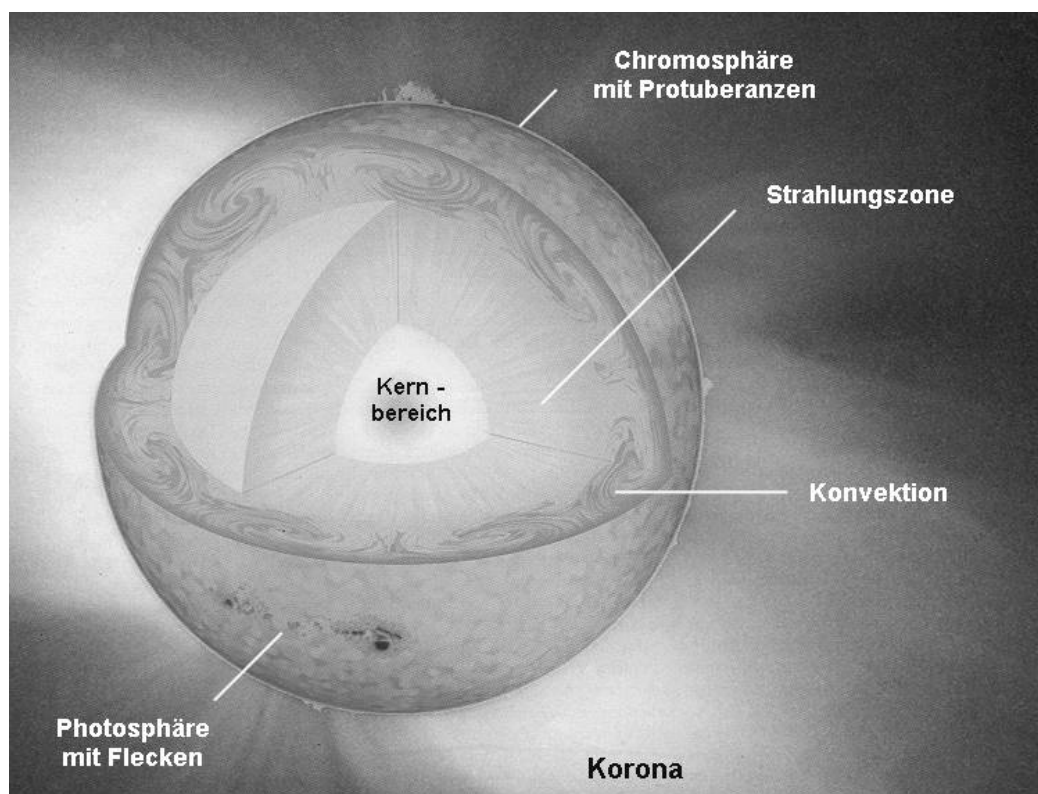
Die Sonne hat im inneren Kern eine Temperatur von ca. 15 Millionen Grad bei einem unvorstellbaren Druck, der dem 300-millardenfachen Luftdruck der Erde in Meereshöhe entspricht. Hier wird die Energie der Sonne erzeugt. Die äußeren Gasschichten, die wir mit dem bloßen Auge sehen, sind immer noch ca. 5.500 Grad heiß (mehr als das doppelte der Schmelztemperatur von Eisen).

Seit 1995 haben die NASA zusammen mit der ESA (European Space Agency) einen speziellen Satelliten (SOHO) zwischen Erde und Sonne stationiert, der die Sonne kontinuierlich in vielen Spektralbereichen (auch solchen, die von der Erdoberfläche nicht zu beobachten sind) „rund um die Uhr“ beobachtet. Soho hat in den letzten Jahren spektakuläre Beobachtungen zur Erde gefunkt.

Stellt man sich die Sonne als Zwiebel vor und wickelt die einzelnen Schalen ab, so definieren die Sonnenphysiker folgende Gebiete (von innen nach außen):

- Sonnenkern
- Strahlungszone
- Konvektionszone
- Photosphäre
- Chromosphäre
- Sonnenkorona

Die Graphik zeigt einen Schnitt durch unsere Sonne und die anschließend folgende Tabelle gibt die wichtigsten physikalischen Daten unserer Sonne:



Unsere Sonne im Schnitt (Quelle Sterne + Weltraum)

Tabelle der wichtigsten physikalischen Parametern unserer Sonne

Durchmesser	1.392.500 km
Volumen	$1.4 \times 10^{18} \text{ m}^3$
Masse	$2 \times 10^{30} \text{ kg}$
Mittlere Dichte	$1.4 \text{ gr pro cm}^3$ (Wasser = $1 \text{ gr pro cm}^3$ )
Dichte im Zentrum	$1.6 \times 10^5 \text{ kg m}^3$
Dichte in der Photosphäre	$1 \times 10^{-6} \text{ kg m}^3$
Dichte in der Korona	$1 \times 10^{-13} \text{ kg m}^3$
Temperatur im Kern	15 Millionen Grad Celsius
Temperatur der Photosphäre	5.500 Grad Celsius
Temperatur in einem Sonnenfleck	4.500 Grad Celsius
Temperatur von Protuberanzen	ca. 50.000 Grad Celsius

Temperaturen in einem Sonnenflare	mehrere 100.000 Grad Celsius
Temperatur der Korona	1 – 2 Millionen Grad
Rotation am Äquator	26 Tage
Rotation am Pol	35 Tage
Alter	ca. 4.6 Milliarden Jahre
Vermutete Lebenszeit der Sonne	weitere 5 – 6 Milliarden Jahre
Magnetische Feldstärken	
Gesamtfeld	ca. 1 Gauß (Erde = 0.1 Gauß)
in Sonnenflecken	ca. 3000 Gauß
in Protuberanzen	ca. 10 – 100 Gauß
Chemische Zusammensetzung der Photosphäre	
Wasserstoff	73.5 %
Helium	42.8 %
Sauerstoff	0.8 %
Kohlenstoff	0.3 %
Eisen	0.15 %
Neon	0.12 %
Stickstoff	0.1 %
Silizium	0.07 %
Magnesium	0.05 %
Schwefel	0.04 %
alle anderen (67 Elemente eindeutig identifiziert)	0.1%

## Der Kern der Sonne

Wie oben schon erwähnt, findet die eigentliche Energieerzeugung der Sonne im Kerngebiet statt. Hier ist die Materie fast vollständig ionisiert, d.b. Atomkerne und Elektronen sind nicht gebunden. Bei den dort herrschenden Temperaturen und dem hohen Druck findet die sogenannte Kernfusion statt. Hierbei werden über mehrere Zwischenstufen 4 Wasserstoffatome zu einem Heliumatom umgewandelt (*Stichwort*: Prinzip der Wasserstoffbombe). Die Massendifferenz zwischen den 4 Wasserstoff- und dem einen Heliumatom wird in reine Energie umgewandelt und als Licht und Wärme abgestrahlt.

Die Umwandlung von einem einzigen Gramm Wasserstoff in Helium erzeugt die Energie von 180.000 KWh (sie entsprechen bei den heutigen Energiepreisen etwa dem Marktwert von 30.000 DM).

Pro Sekunde werden im Sonnenkern grob 6 Milliarden Tonnen Wasserstoff umgewandelt, dabei entsteht der Sonne gleichzeitig ein Massenverlust von 4 Millionen Tonnen in jeder Sekunde. Dies bedeutet nichts anderes, als dass die Sonne pro Sekunde um 4 Millionen Tonnen leichter wird. Diese Zahl mutet dramatisch an, ist sie aber Angesichts der gewaltigen Dimensionen der Sonne nicht.

Rechnet man diesen Massenverlust über eine Zeitspanne von 10 Milliarden Jahren hoch, so entspricht dies nur ca. 0.1 % der Gesamtmasse der Sonne.

Die im Kernbereich erzeugte Energie der Sonne wird über eine lange Wegstrecke durch die Sonnenkugel bis zur Abgabe ins Weltall durch Strahlung übertragen. Dies dauert einige

100.000 Jahre. Erst kurz (ca. 250.000km) unterhalb der Photosphäre wird die Energie durch sogenannte Konvektion (Strömung) weitertransportiert.

In dieser Konvektionszone werden Gasblasen (jede etwa von der Größe des afrikanischen Kontinents) aufgeheizt. Diese steigen nach oben, strahlen die Energie ab, kühlen dabei ab und sinken wieder nach unten und nehmen erneut Energie auf. Diese Gasblasen nennt man Granulen, die Gesamtheit Granulation (**Stichwort:** Gasblasen in kochendem Wasser ist ein sehr ähnlicher Prozess).

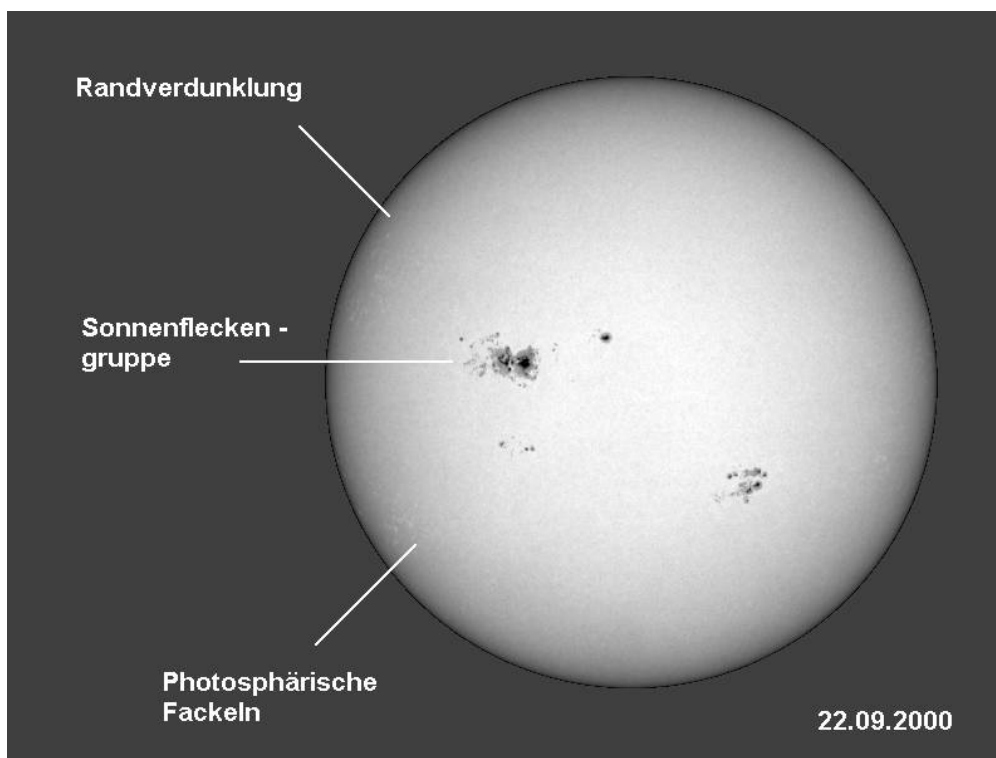
## Die Photosphäre der Sonne

Die Photosphäre ist – ist mit dem bloßen Auge betrachtet – die „Sonnenoberfläche“. Ihre Temperatur beträgt etwa 5.500 Grad Celsius. Die Photosphären“zwiebelschale“ ist nur 400 km mächtig, und doch wird aus ihr praktisch alles Licht und alle Wärme ins Weltall abgestrahlt.

### Beobachtbare Phänomene der Photosphäre:

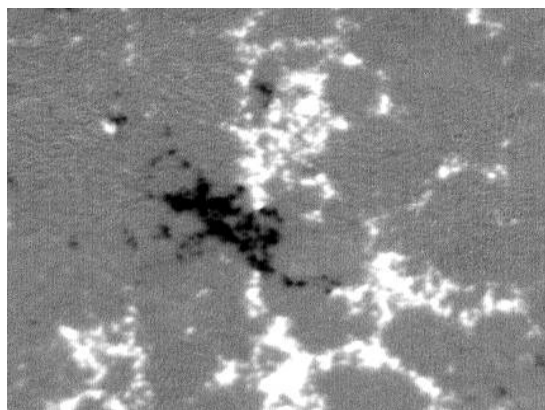
- Sonnenflecken
- Sonnenfackeln
- Granulation
- Randverdunklung

Sonnenflecken sind schwarz erscheinende Zonen der Photosphäre und bestehen aus einer Umbra (Kern) und einer Penumbra (Außengebiete). An den Orten der Sonnenflecken treten magnetische Feldlinien aus dem Sonneninnern an die Oberfläche. Dadurch wird die Granulation gestört. Der Energietransport wird abgeschwächt und die Photosphäre an diesen Orten abgekühlt. Sonnenflecken sind ca. 1500 Grad kühler als die ungestörte Photosphäre, deshalb erscheinen sie uns dadurch dunkel gegen die helle Photosphäre.

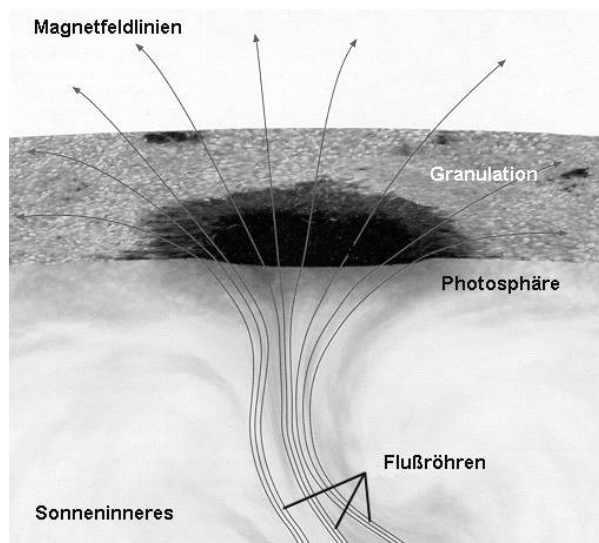


Die Photosphäre der Sonne mit Flecken, Fackeln und Randverdunklung (Foto: Paech)

Sonnenflecken treten meist in Gruppen auf, man nennt sie auch Aktivitätsgebiete der Photosphäre. Sonnenflecken haben meist bipolare (Nord/Süd) Magnetfelder die hoch bis über die Chromosphäre bis in die Korona reichen können.

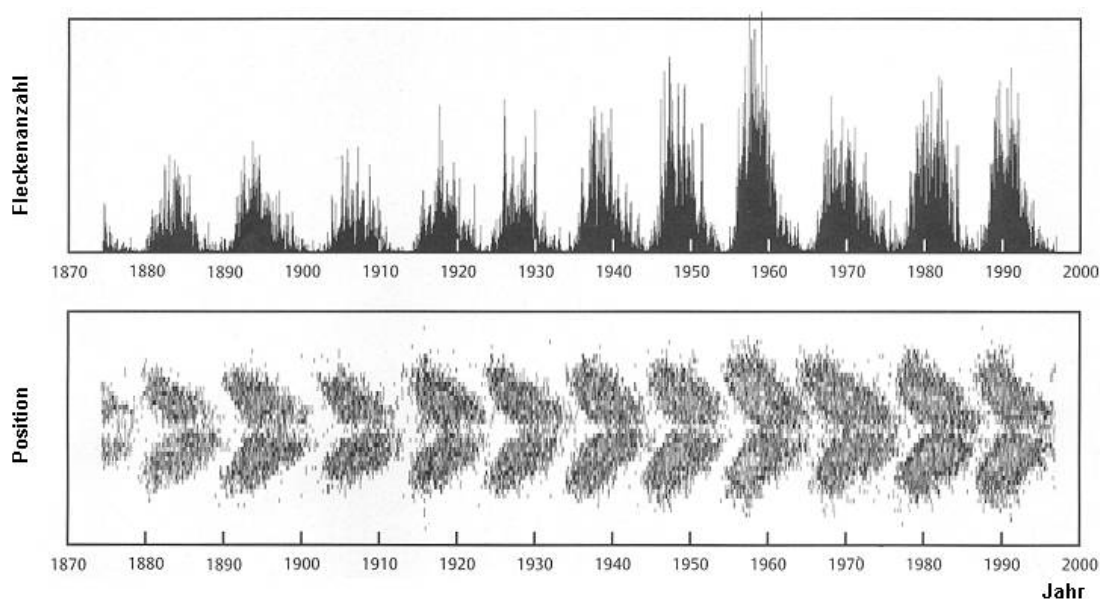


Magnetbild einer Sonnenfleckengruppe. Magnetisch Nord ist schwarz- magnetisch Süd weiß kodiert (Quelle NASA).

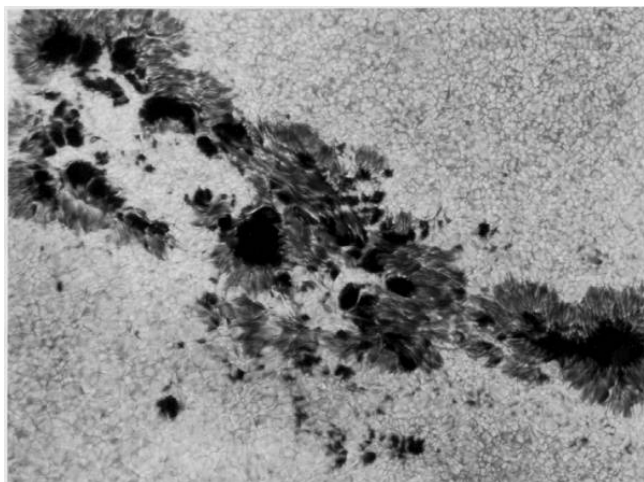


Modellvorstellung von Flußröhren und Magnetfeldlinien in einem Sonnenfleck (Graphik: Quelle SuW)

Sonnenflecken treten – **wie alle anderen solaren Phänomene** – regelmäßig in einem 11 jährigen Aktivitätszyklus auf. Alle 5.5 Jahre gibt es ein Aktivitätsmaxima, alle 5.5 Jahre ein Aktivitätsminimum. Gemessen wird der Stand des Zyklus durch die sogenannte Sonnenfleckenzahl, heute nimmt man allgemein den Fluß der Radiostrahlung der Sonne. Verantwortlich für diesen Zyklus ist das/die Magnetfelder der Sonne (*Stichwort*: Kippen des Gesamtmagnetfeldes alle 22 Jahre). Dieser Sonnenfleckenzyklus existiert sicher schon einige Tausend Jahre (*Stichwort*: Wachstumsringe in Baumstämmen).



Die Abbildung zeigt den Fleckenzyklus der Sonne seit dem Jahr 1870. Oben ist die Häufigkeit der Flecken graphisch aufgetragen. Die untere Messreihe zeigt das sogenannte Schmetterlingsdiagramm. Hier sind die Positionen aller Sonnenflecken aufgetragen. Am Beginn eines jeden Zyklus entstehen die Sonnenflecken immer in der Nähe der Sonnenpole, um während des Zyklus langsam Richtung Sonnenäquator zu driften.



Große, komplexe Sonnenfleckengruppe mit umgebender Granulation (Quelle NASA)

Sonnenfackeln treten meist zusammen mit Sonnenfleckengruppen auf. Es sind ebenfalls gestörte Gebiete der Photosphäre, die heller (ca. 1.000 Grad) und damit heißer sind. Beobachtet man Fackeln ohne Flecken, so ist in wenigen Tagen mit dem Entstehen von Sonnenflecken zu rechnen. Sie werden am Rand der Sonne – bedingt durch die Randverdunklung - besonders auffällig.

Die einzelnen Granulation der Sonnengranulation wurden bereits oben beschrieben. Helle Granulen sind die heißeren, die gerade nach oben steigen, die dunkleren haben ihre Energie bereits abgestrahlt und sinken wieder nach unten. Die vertikalen Geschwindigkeiten der Granulen betragen einige Kilometer pro Sekunde.

Die Randverdunklung der Sonnenscheibe ist ein optisches Phänomen und erklärt sich wie folgt: schauen wir direkt auf die Sonnenmitte, so können wir tiefer in die Photosphäre hineinschauen und sehen heißere Gasschichten. Schauen wir auf den Rand der Sonne erblicken wir höhere Gasschichten, die kühler sind.

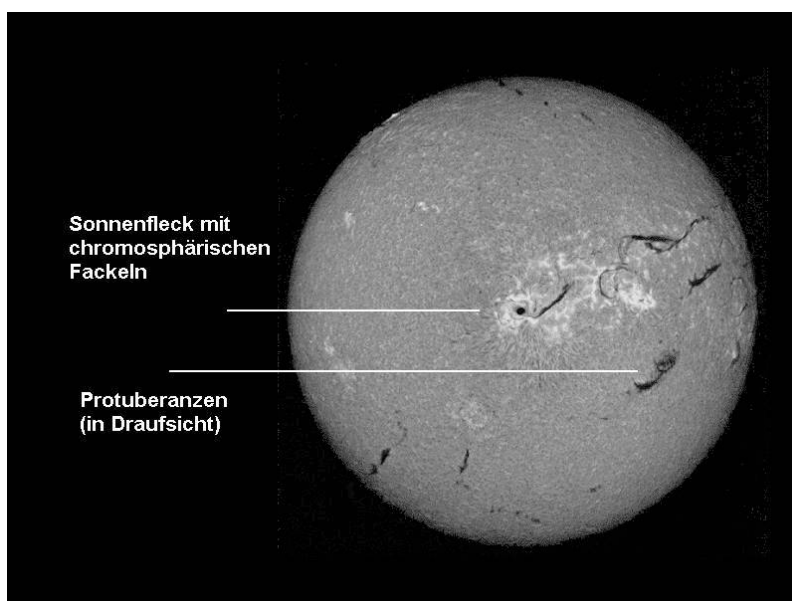
## Die Chromosphäre der Sonne

Die Chromosphäre der Sonne ist die Gasschale der Sonne, die über der Photosphäre liegt. Ihre Dichte (Anzahl der Atome) ist wesentlich geringer als die der Photosphäre, außerdem strahlt sie Licht nur einer einzigen Wellenlänge (der des Wasserstoffatoms) ab. Die Lichtintensität beträgt nur ein Millionstel der Photosphäre. Deshalb braucht man Spezialteleskope und spezielle Filter, um diese Gasschicht dem Auge sichtbar zu machen (*Stichwort*: sie wird ebenfalls während einer totalen Sonnenfinsternis sichtbar).

Die Chromosphäre ist nur ca. 10.000 Kilometer mächtig aber in ihr steigt die Temperatur an der Grenze zur Photosphäre von ca. 5.500 Grad auf mehrere 10.000 Grad zur Grenze der Korona an. Der Mechanismus der Aufheizung ist weitgehend ungeklärt.

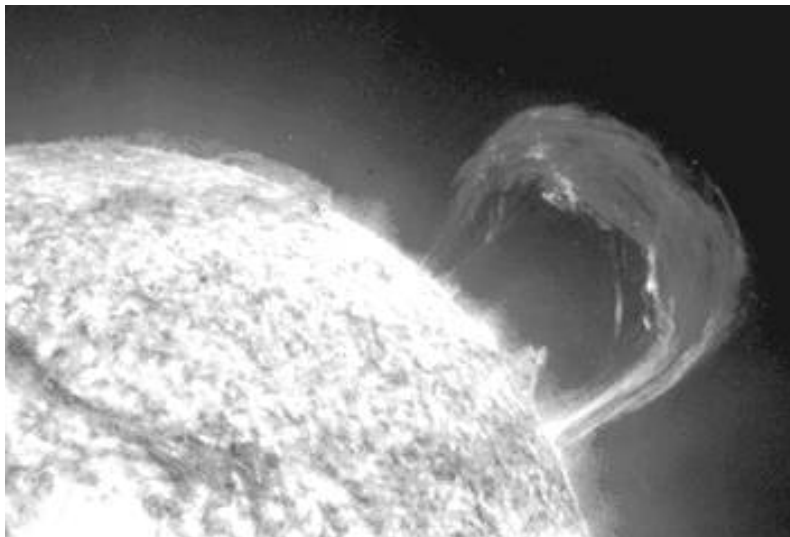
### Beobachtbare Phänomene:

- Sonnenprotuberanzen
- Sonnenflares



Die Chromosphäre der Sonne (Foto: Paech)

Protuberanzen sind heftige Explosionen von Wasserstoffgas, die (fast) immer mit Sonnenfleckaktivitätsgebieten gekoppelt sind (Störungen der magnetischen Flussröhren. *Stichwort:* magnetische- und elektrische Kurzschlüsse). Beobachtet man sie am Sonnenrand gegen das schwarze Weltall erscheinen sie von tiefroter Farbe und man nennt sie Protuberanzen. Beobachtet man sie auf der Sonnenoberfläche (sozusagen in Draufsicht), erscheinen Sie dunkel und man bezeichnet sie dann als Filamente.



Riesenprotuberanz (Foto: Raumsonde SOHO, NASA und ESA)

Die Gasmassen folgen dabei meist den magnetischen Flußröhren und zeigen dabei meist bogenförmige Strukturen, wobei die Materie von einem magnetischen Pol aufsteigt und zum anderen Pol wieder auf die Sonne herabstürzt. Die Geschwindigkeiten können bis zu 1.000 Kilometer pro Sekunde betragen.

Brechen die Magnetfeldlinien auf, in der die Gasteilchen gefangen sind, kann die Materie bei heftigen Explosionen die Anziehungskraft der Sonne überwinden und das Gas entweicht in den Weltraum. Protuberanzen steigen weit in die Korona auf und beeinflussen auch Strukturen in der Korona (*Stichwort:* Koronale Massenauswürfe – Polarlichtaktivität).

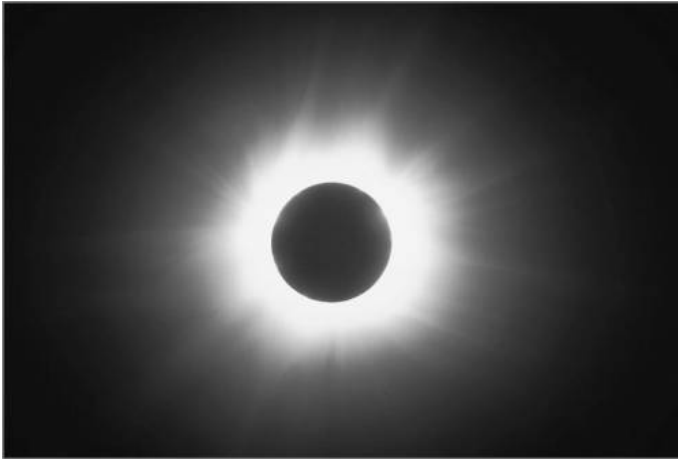
Chromosphärische Flares sind regional begrenzte, schlagartige, Aufheizungen der Sonnenmaterie. Die Energien die dabei freigesetzt werden, reichen aus sowohl Materie als auch sehr energiereiche elektrische Teilchen (Elektronen und Protonen) mit extrem hohen Geschwindigkeiten ins Weltall zu schleudern. Sie werden wahrscheinlich durch Zusammenbrüche oder Verschmelzungen von magnetischen Flußöhren ausgelöst.

Die Energien, die dabei freigesetzt werden können, entsprechen dem 100-milliardenfachen der Hiroshima Atombomben.

Treffen die energiereichen Teilchen auf das Erdmagnetfeld und die Atome der Atmosphäre, so lösen sie unter anderem Polarlichterscheinungen aus. Sie beeinflussen aber auch das Gesamtmagnetfeld der Erde und stören die Ionosphäre (*Stichwort:* Zusammenbrechen von Funkverkehr, Induzieren von elektrischen Strömen z.B. in Pipelines, Störungen in Elektro kraftwerken, etc).

## Die Korona der Sonne

Die Sonnenkorona ist – wenn man so will – die Atmosphäre der Sonne. Die Dichte (Anzahl der Atome) ist noch wesentlich geringer als die der Chromosphäre und auch die Lichtintensität im Vergleich zur Chromosphäre noch geringer. Man kann sie mit bloßem Auge nur während totaler Sonnenfinsternisse sehen, wenn das Licht der Photosphäre durch den Mond abgedeckt ist. Sie hat eine Ausdehnung von mehreren Sonnendurchmessern.



Äußere Sonnenkorona während einer totalen Sonnenfinsternis (Foto: Paech)

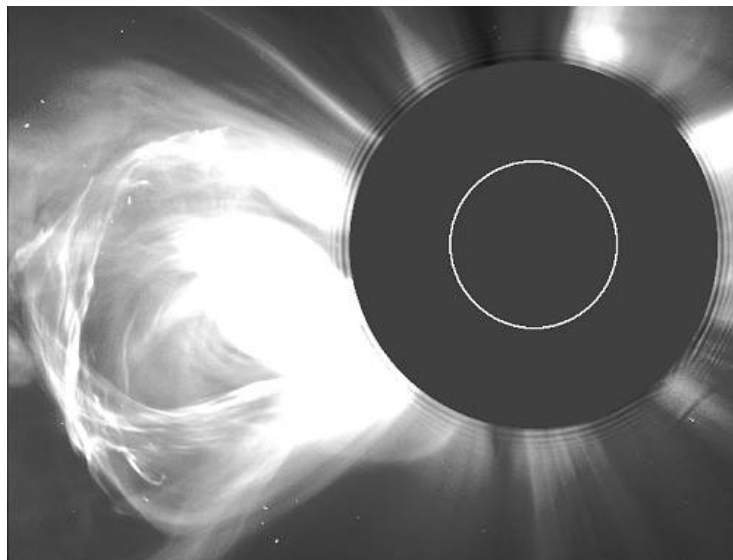
Bis vor wenigen Jahren konnte man die innere Korona auch mit Spezialteleskopen von hohen Bergen aus beobachten. Durch die globale Luftverschmutzung (die Teilchen erzeugen Streulicht) ist dies nur noch an wenigen Tagen im Jahr möglich.

Die Temperatur in der Sonnenkorona steigt über der Grenze zur Chromosphäre schlagartig auf 1 – 2 Millionen Grad an. Dieser Effekt ist ebenso nahezu unverstanden, da der Energiefluss der die Aufheizung bewirkt kontinuierlich, fließen muss, da außerhalb der Korona die Temperatur des Weltalls von  $-273$  Grad Celsius herrscht. Diskutiert werden als Ursache zur Zeit: Schallwellen und permanente elektrische und magnetische (Mikro)Kurzschlüsse.

**Beobachtbare Phänomene** (nur in bestimmten Wellenlängen von außerhalb der Atmosphäre zu beobachten)

- Koronale Massenauswürfe
- Koronale Löcher

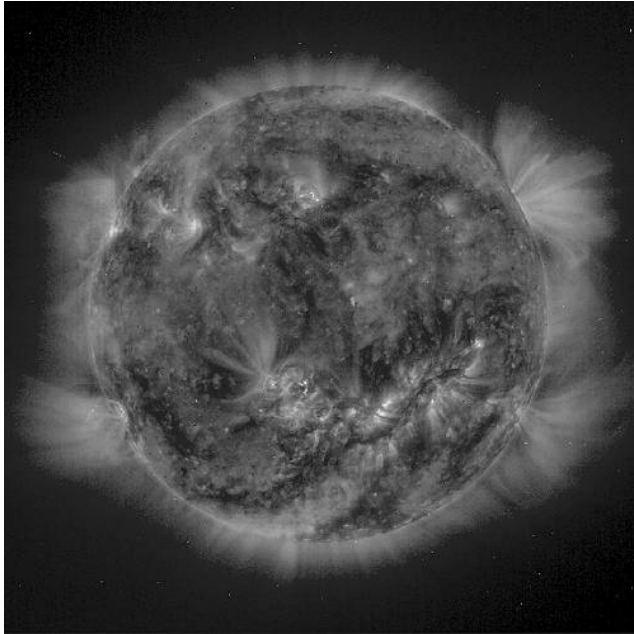
Gigantischer koronaler Massenauswurf am 27.2.2000. Der Sonnendurchmesser entspricht dem eingezeichneten weißen Kreis. Die Sonne selbst ist durch die schwarze Scheibe abgedeckt (Foto: SOHO, NASA und ESA)



Koronale Masseauswürfe sind gigantische Explosionen, die Materie aus der Korona herausschleudern. Dazu kommen ebenfalls energiereiche elektrische Teilchen.

Sie sind so heftig, dass, wenn sie auf die Erde gerichtet sind, immer starke Störungen des Erdmagnetfeldes auslösen. Auslöser dieser koronalen Massenauswürfe können große Protuberanzenexplosionen und/oder Sonnenflares sein.





Die innere Sonnenkorona im Röntgenlicht mit koronalen Löchern (Aufnahme SOHO, NASA und ESA)

Damit das Sonnenplasma die Korona verlassen kann, braucht es allerdings Koronale Löcher. Diese Löcher sind nahezu materiefrei, auch scheint es dort kein Magnetfeld zu geben, oder aber es ist extrem gering. Koronale Löcher kennt man erst seit den Beobachtungen der Sonne im Röntgenlicht durch spezielle Raumsonden.

**Besonderheit:** Koronale Löcher scheinen starr – **und nicht differentiell** – mit der Sonne zu rotieren.

## Weitere Erscheinung der Sonne

Eine weitere Erscheinung der Sonnenkugel, die nicht sichtbar aber messbar ist, ist die Pulsation der Sonne. Unsere Sonne pulsiert mit verschiedenen Frequenzen. Das bedeutet, dass sie sich tatsächlich rhythmisch aufbläht und anschließend wieder zusammenzieht.

Sie ändert dabei Ihren Durchmesser in einem ca. 5-minütigen Rhythmus um ca. 1.000 – 2.000 Kilometer im Durchmesser.

Solche Pulsationen kennen die Astronomen von anderen Fixsternen im Weltall, man nennt sie Veränderliche Sterne. Hier ändert sich der Durchmesser – und damit die Helligkeit des Sterns – allerdings dramatisch und nicht vergleichbar mit der Sonne.

## Der Sonnenwind

Auch in Zeiten, in denen die Sonne relativ "ruhig" ist, also in den Zeiten um das Aktivitätsminimum herum, strahlt die Sonne einen kontinuierlichen Strom von Elektronen und Protonen ab, der permanente Wechselwirkung mit dem Erdmagnetfeld hat.

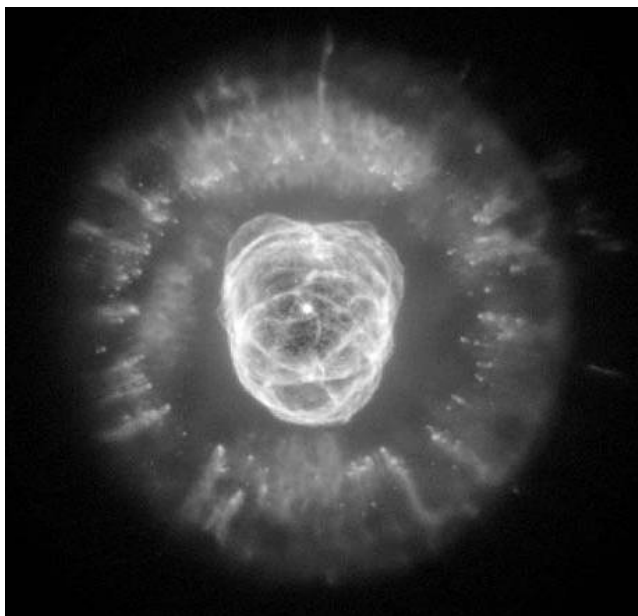
## Solar – terrestrische Beziehungen

Sicherlich gibt es Auswirkungen der Sonnenaktivität auf unsere Erde. Die deutlich gesicherten sind Einflüsse auf die Höhe von Ebbe und Flut in Zusammenhang mit dem Erdmond. Weiterhin gesichert sind die Einflüsse auf das Erdmagnetfeld und die Ionosphäre der Erde (Stichworte: Polarlichter, Strominduzierung in langen metallischen Leitern oder großen Transformatoren von Kraftwerken, Störung bis hin zur elektrischen Zerstörung von Satellitenelektronik).

Ungesichert sind Zusammenhänge mit dem irdischen Wetter, wie Gewitterhäufigkeit, globalem Erdklima (Stichwort: Maunder Minimum um 1750) oder z.B. Sterberate oder Herzinfarkthäufigkeit beim Menschen.

## Die weitere Entwicklung unserer Sonne

In etwa 5 Milliarden Jahren wird der Wasserstoff im Kern der Sonne aufgebraucht sein. Die Wasserstoff-Helium Fusion schiebt sich dann langsam "schalenartig" nach außen. Dabei dehnt sich die Sonne langsam auf den ca. 150fachen ihres jetzigen Durchmessers aus und wird zu einem roten Riesenstern, dessen „Oberfläche“ dabei bis über die Erdbahn hinauswächst. Im Innern steigt die Temperatur und der Fusionsprozess von Helium wechselt zu dem nächsthöheren Element.



Der Eskimonebel. Er ist ein Planetarischer Nebel im Sternbild der Zwillinge. Im Zentrum erkennt man den weißen Zwergstern, aus dem der Nebel gebildet wurde (Foto: NASA, Hubble Space Teleskop)

Der Einfluss der Gravitation auf die ionisierte Materie wird geringer und der Sonnenwind steigt dramatisch an. Während der Riesensternphase bläst unsere Sonne etwa 40% ihrer Masse in den Raum ab. Dadurch werden tief im Innern liegende sehr heiße Schichten der Sonne freigelegt, die intensives ultraviolettes Licht abstrahlen und die Gashülle zum Leuchten durch Ionisation anregt.

Ein Planetarischer Nebel ist um die Sonne entstanden und bildet ein prachtvolles Finale nach ca. 12 Milliarden Jahren Lebensdauer. Während der Entstehung dieses Nebels erlischt jedwede Kernfusion, die Sonne „geht sozusagen aus“.

Da der Strahlungsdruck aus dem Innern fehlt, fällt die verbleibende Materie bis auf ca. 15.000 km Durchmesser (etwas Erdgröße) zu einem weißen Zwergstern in sich zusammen. Diese „Sternenleiche“ wird über weitere Jahrtausende auskühlen, bis alle Wärme abgestrahlt ist.

© 2009 Wolfgang Paech

### Surftipps:

Aktuelle Sonnenbilder und –filme der Raumsonde SOHO

<http://sohowww.nascom.nasa.gov/data/realtime-images.html>

Stand der Sonnenaktivität, Polarlichtaktivität, aktuelle Sonnenbilder und weitere aktuelle Infos zu astronomischen Ereignissen wie Finsternisse und Meteorströme

<http://www.spaceweather.com>